

**Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství**

**Katedra ochrany životního prostředí v průmyslu**

**Analýza emise volatilních látek rostlinami v měnících se podmínkách  
prostředí**

**Analysis of Emission of Volatile Compounds in Plants in Changing  
Environment Conditions**

**Vypracovala: Radka Plačková**

**Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Martina Vráblová**

**Ostrava 2016**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra ochrany životního prostředí v průmyslu

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radka Plačková**  
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: 2805R001 Chemie a technologie ochrany prostředí  
Téma: **Analýza emise volatilních látek rostlinami v měnících se podmínkách prostředí**  
**Analysis of Emission of Volatile Compounds in Plants in Changing Environment Conditions**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše na téma emise biogenních volatilních látek (BVOC) vyššími rostlinami.
2. Zavedení a optimalizace chromatografické metody pro měření významných BVOC.
3. Stanovení vlivu teploty a ozáření na emise BVOC.
4. Vyhodnocení naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

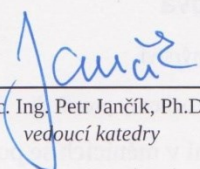
- [1] Calfapietra, C.; Fares, S.; Manes, F.; et al. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. ENVIRONMENTAL POLLUTION 183 SI (2013), 71-80
- [2] Curtis, A. J.; Helmig, D.; Baroch, C.; et al. Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT 95 (2014), 634-643
- [3] Unger, N. On the role of plant volatiles in anthropogenic global climate change. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 41(23) (2014), 8563-8569
- [4] Rosenkranz, M.; Pugh, T. A. M.; Schnitzler, J.-P.; et al. Effect of land-use change and management on biogenic volatile organic compound emissions - selecting climate-smart cultivars. PLANT CELL AND ENVIRONMENT 38 (9) SI (2015), 1896-1912
- [5] Loreto, F.; Dicke, M.; Schnitzler, J.-P.; et al. Plant volatiles and the environment. PLANT CELL AND ENVIRONMENT 37 (8) SI (2014), 1905-1908

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

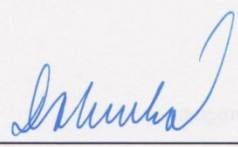
Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Martina Vráblová**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
doc. Ing. Petr Jančík, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty



## Zásady pro vypracování bakalářské práce

### I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

### II.

#### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání. BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje - horní, dolní - 2,5 cm, levý - 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

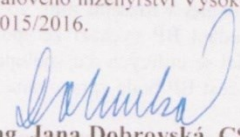
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**

děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

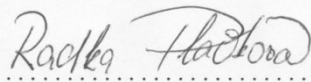
## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 29. 4. 2016 .....

  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

Chtěla bych poděkovat Mgr. Martině Vráblové za odborné vedení, trpělivost, čas a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Mé poděkování dále patří Ing. Petru Maršolkovi za pomoc při analýzách. Materiál pro analýzy byl hrazen ze studentského grantového projektu IET SP2016/62 Termické zpracování odpadů a ochrana životního prostředí.



## **Anotace**

Biogenní těkavé organické látky (BVOC) mají původ zejména v přírodě a tvoří významnou složku atmosféry. Zejména BVOC uvolňované ze zeleně mohou za určitých podmínek při reakci s polutanty v ovzduší tvořit přízemní ozon či sekundární organické aerosoly. Hlavními prekurzory ozonu z řad BVOC jsou terpeny a isopren, jež jsou v našich podmínkách uvolňovány především stromy. Míra emise BVOC závisí především na druhu vegetace, teplotě, množství slunečního záření a látkách v ovzduší. Cílem této práce bylo sestavit metodiku odběru BVOC z běžně zastoupených stromů (topol, buk a smrk) a jejich vyhodnocení pomocí plynové chromatografie spojené s termální desorpcí. Za měnící se parametry prostředí byla zvolena teplota a ozáření, jelikož tyto parametry nejvíce ovlivňují emisi BVOC a jsou v laboratorních podmínkách snadno nastavitelné a měřitelné.

**Klíčová slova:** biogenní těkavé organické látky, isoprenoidy, vegetace, plynová chromatografie, termální desorpce

## **Annotation**

The origin of biogenic volatile organic compounds (BVOC) is mainly in the nature and they are a significant component of the atmosphere. Especially BVOC released from vegetation, which react with pollutants in the air can form tropospheric ozone and secondary organic aerosols. The main precursors of ozone from among biogenic VOCs are terpenes and isoprene, in our conditions mainly released by trees. BVOC emission rate depends on the species of the vegetation, temperature, amount of sunlight and substances in the air. The aim of this work was to create a methodology of sampling BVOC from commonly represented trees (poplar, beech and spruce) and for evaluation used gas chromatographic method coupled with thermal desorption. For changing environmental parameters were selected temperature and irradiation, because these parameters have the most effect on the emission BVOC and in laboratory conditions are easily adjustable and measurable.

**Key words:** biogenic volatile organic compounds, isoprenoids, vegetation, gas chromatography, thermal desorption



# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>BVOC.....</b>	<b>11</b>
2.1	ISOPRENOIDY .....	11
2.2	ISOPREN.....	12
2.3	MONOTERPENY .....	12
2.4	POROVNÁNÍ VOC ANTROPOGENNÍHO A BIOGENNÍHO PŮVODU .....	14
<b>3</b>	<b>REAKCE BVOC.....</b>	<b>14</b>
3.1	OZON .....	16
3.2	TVORBA OZONU.....	17
3.3	SNÍŽOVÁNÍ KONCENTRACE OZONU ROSTLINAMI .....	18
<b>4</b>	<b>VLIV PODMÍNEK PROSTŘEDÍ NA EMISI BVOC .....</b>	<b>20</b>
4.1	EMISE ISOPRENU Z LISTŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ.....	20
4.2	EMISE ISOPRENOIDŮ V ZÁVISLOSTI NA OZÁŘENOSTI .....	23
4.3	EMISE ISOPRENU V ZÁVISLOSTI NA KONCENTRACI OXIDU UHLÍČITÉHO.....	23
4.4	EMISE ISOPRENU V ZÁVISLOSTI NA KONCENTRACÍCH OXIDŮ DUSÍKU .....	24
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ BVOC .....</b>	<b>25</b>
5.1	HISTORIE MĚŘENÍ BVOC.....	25
5.2	METODA VZORKOVÁNÍ NA SORBENT .....	26
5.3	CHROMATOGRRAFIE.....	26
5.3.1	<i>Plynová chromatografie .....</i>	<i>27</i>
5.4	ADSORPCE.....	28
<b>6</b>	<b>VÝBĚR ROSTLINNÝCH DRUHŮ A PARAMETRY MĚŘENÍ.....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>ODBĚR VZORKŮ A JEJICH ANALÝZA .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>49</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>51</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>53</b>

# 1 Úvod

Zdrojem těkavých organických látek (VOC) může být jak antropogenní činnost, tak i samotná příroda. Pokud jde o výskyt těchto látek z přírody, hovoříme o biogenních těkavých organických látkách (BVOC). Z biogenních těkavých organických látek, jichž je nesmírné množství, je nejvíce zastoupen isopren a terpeny, které se uvolňují z vegetace mimo jiné ve stresových situacích nebo například po napadení škůdci.

Biogenní těkavé organické látky emitují listnaté stromy, jako jsou topoly, duby, akáty, vrby, lípy, ale i jehličnaté stromy. Kromě podmínek prostředí je míra emise BVOC závislá i na druhu daného stromu.

Stromy ovlivňují teplotu vzduchu, albedo, vlhkost vzduchu, absorpci a radiaci sluneční energie, akumulaci tepla, rychlost větru. V důsledku změn v místní meteorologii může docházet ke změně koncentrací znečišťujících látek. Stromy zachytávají plynné znečištění nejčastěji přes listy, některé plyny mohou být zachytávány povrchem rostlin. Plyny, které se dostanou do listu, dále difundují do mezibuněčného prostoru, kde mohou být absorbovány vodními filmy a vznikají tak kyseliny, nebo může docházet k reakci s vnitřním povrchem listu. Stromy mohou také zachytit poletující prach. Některé částice mohou být stromy absorbovány, většina částic je však zachycena na jejich povrchu. Tyto částice často nesuspendují do atmosféry, jsou smyty deštěm nebo klesnou na zem s listy a větvíčkami na podzim.

Emise těkavých organických látek ze stromů může přispět k tvorbě ozonu a sekundárních organických aerosolů. Nicméně v atmosféře s nízkou koncentrací oxidů dusíku mohou těkavé organické látky ozon odstraňovat. Emise volatilních organických látek je teplotně závislá a stromy obecně snižují teplotu vzduchu. Zvýšením pokryvu území vhodnými stromy může dojít k celkovému snížení emisí těkavých organických látek a v důsledku toho, ke snížení koncentrace ozonu.

Cílem této práce je zavedení a optimalizace odběru vzorku společně s chromatografickou metodou pro měření významných BVOC. Součástí práce je stanovení vlivů teploty a ozáření na emise BVOC vyššími rostlinami.

## 2 BVOC

Biogenní volatilní organické látky (BVOC) jsou rozmanitou skupinou látek emitovaných do ovzduší především fotosyntetizujícími rostlinami. Z databáze emisí BVOC lze vyčíst, že v atmosféře jsou z této skupiny nejvíce zastoupeny isoprenoidy. Dále se jedná o alkany, alkeny, karbonyly, alkoholy, estery, ethery a kyseliny. Isoprenoidy lze rozdělit do dvou hlavních skupin na - isopren a terpeny. Z terpenů jsou nejvýznamnější monoterpeny. Životnost těchto látek v ovzduší je od několika minut po hodiny v závislosti na druhu emitované látky. Obvykle jsou tyto sloučeniny silně aromatické a těžce rozpustné ve vodě. [1]

### 2.1 Isoprenoidy

Isoprenoidy jsou přírodní uhlíkaté látky vznikající v důsledku metabolismu rostlin. Tuto skupinu lze rozdělit na isopren a terpeny (monoterpeny, seskviterpeny, diterpeny, triterpeny až polyterpeny). S rostoucím počtem uhlíků v řetězci roste i teplota varu, což vede ke snížené těkavosti těchto látek. K tvorbě isoprenu dochází v chloroplastu působením isopren syntázy na 3,2-dimethylallyl-difosfát v přítomnosti iontů hořčíku.[2]

Podle posledních výzkumů emise dosahují hodnoty  $1150 \text{ Tg C} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Konkrétně  $503 \text{ Tg C} \cdot \text{rok}^{-1}$  emise isoprenu,  $127 \text{ Tg C} \cdot \text{rok}^{-1}$  monoterpeny,  $260 \text{ Tg C} \cdot \text{rok}^{-1}$  reaktivní organické těkavé látky a zbývajících  $260 \text{ Tg C} \cdot \text{rok}^{-1}$  ostatní organické sloučeniny. [2]

K emisi isoprenu dochází ihned po jeho vzniku, kdežto terpeny mohou být uloženy v rostlinách a k jejich emisi může docházet postupně.[1]

Mezi terpeny například řadíme například  $\alpha$ -pinen,  $\beta$ -pinen, menthol, kafr, limonen,  $\beta$ -karyofylen a geraniol.[1]

Isopren v kombinaci s antropogenními oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  produkuje ozon. Monoterpeny a seskviterpeny mohou přispět k tvorbě kondenzačních jader mraků a tím poskytnout základ pro růst sekundárních organických aerosolů SOA.[3]

## 2.2 *Isopren*

Jedna molekula isoprenu může vést k tvorbě mnoha molekul ozonu, zejména pokud jsou koncentrace  $\text{NO}_x$  vysoké. V případě, že je nízká úroveň  $\text{NO}_x$ , emise isoprenu z rostlin naopak může koncentraci ozonu v atmosféře snížit. Výtěžek aerosolu na molekulu isoprenu v atmosféře je nižší, než pro monoterpeny a větší molekuly. Ale protože se isopren v atmosféře vyskytuje v relativně velkém množství, může být právě on významným faktorem tvorby aerosolů. Bylo dokázáno, že uvolňování isoprenu z rostlin probíhá za zvýšené teploty a hlavně pokud jsou vystaveny přímému slunečnímu záření. Jednou z úvah je, že rostliny produkují isopren v obraně před tepelným stresem, aby nedocházelo k tvorbě tepelných fleků. Druhou z úvah je, že rostliny se emisí isoprenu brání před reaktivními formami kyslíku. Pokud dochází k trvalému tepelnému stresu, isopren v rostlinách ztrácí svou funkci.[4]

Emise isoprenu z biogenních zdrojů se odhaduje na  $440\text{--}600 \text{ Tg C}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Na rozdíl od toho je celková globální emise antropogenních volatilních organických látek přibližně  $1\,000 \text{ Tg C}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Isopren je také vedlejším produktem metabolických syntéz cholesterolu u člověka a je vylučován výdechem. Bylo dokázáno, že zmenšení koncentrace antropogenních těkavých organických látek nehraje tak velkou roli ve snižování troposférického ozonu, důležité jsou právě emise těchto látek z biogenních zdrojů.[5]

## 2.3 *Monoterpeny*

Monoterpeny jsou cyklické látky odvozené od isoprenu mající svou charakteristickou vůni. Regulují růst, reprodukční cykly a obranné mechanismy rostlin. Nejrozšířenější z řad monoterpenů je  $\alpha$ -pinen a  $\beta$ -pinen vyskytující se v pryskyřicích jehličnanů. Tyto látky patří do řad sekundárních metabolitů, takže se neúčastní žádných základních rostlinných procesů, slouží rostlině jako detoxikační faktory, atraktanty, morforegulatory nebo obranné látky. Monoterpeny v rostlinách vznikají v parenchymatických buňkách a následně jsou ukládány do vakuol, buněčné stěny nebo exkretčních pletiv. Monoterpeny v rostlinách plní několik funkcí a to například, že vábí opylující hmyz, chrání rostlinu před napadením škůdci a před vysycháním. Neméně podstatná je jejich funkce zajišťující komunikaci mezi rostlinami. [6]



Biosyntéza monoterpenů může probíhat buď mevalonátovou nebo pyruvátovou cestou. Mevalonátovou cestou vzniká isopentenylidifosfát IPP z acetylkoenzymu A a kyseliny mevalonové v cytosolu buněk. Izomerizací z IPP vzniká dimethylallyldifosfát DMAPP.[6]

Pyruvátovou cestou (**Rohmerova**) vzniká IPP a DMAPP syntézou přes 1-deoxy-D-xyluloso-5- fosfát v plastidech buněk. DMAPP nevzniká izomerizací IPP, ale jde o dva odděleně vznikající produkty. Bylo prokázáno propojení obou těchto cest. Prekurzory vzniklé pyruvátovou cestou v plastidech mohou být poskytovány pro syntézu triterpenů a seskviterpenů v cytosolu.[6]

Biosyntézu můžeme rozdělit do 4 fází:

1. Tvorba základních stavebních jednotek terpenů pyruvátovou cestou (isopentenylidifosfátu IPP a dimethylallyldifosfátu DMAPP).
2. Kondenzace isopentenylidifosfátu (IPP) a dimethylallyldifosfátu (DMAPP) za vzniku geranylidifosfátu (GPP).
3. Vznik základního skeletu monoterpenické podskupiny transformací GPP.
4. Modifikace základního skeletu za vzniku derivátů.[6]

Rostliny po napadení zvyšují emisi monoterpenů nebo mění jejich složení a to i v částech, které napadeny nebyly. Uvolňování těchto látek je závislé na části napadené rostliny, ale také na druhu škůdce. Od doby, kdy byla rostlina napadena, klesá emise monoterpenických alkenů, ale naopak s časem roste emise oxidovaných monoterpenů. Rostlina dokáže identifikovat, zda byla napadena škůdcem nebo došlo k mechanickému poranění, jelikož pro produkci monoterpenů je důležitá kombinace vzájemné interakce rostliny, mikroorganismu a hmyzu. Vůně monoterpenů je důležitým faktorem při opylování vedoucí k zachování druhu. Po napadení škůdcem rostliny mezi sebou dokáží komunikovat chemickými signály, ať už půdou či vzduchem. Mezi mediátory patří i určité monoterpeny ( $\beta$ -ocimen). [6]

## **2.4 Porovnání VOC antropogenního a biogenního původu**

V současné době došlo k mírnému poklesu emisí těkavých organických látek antropogenního charakteru v důsledku snížení limitů emisí těchto látek u automobilů. Mezi nejhojněji zastoupenou látku z antropogenních zdrojů patří benzen. Další významnou složkou je toluen uvolňovaný při používání rozpouštědel a taktéž v silniční dopravě.[5]

Podle výzkumu v německém Essenu ve vegetačním období, byly nejvyšší koncentrace isoprenu měřeny mezi 10 a 20 hodinou, naopak nejnižší byly večer a v první polovině noci. Nejvyšší hodnoty benzenu a toluenu byly zjištěny během ranní dopravní špičky a k večeru, nejnižší pak v časných odpoledních hodinách. Průměrné koncentrace isoprenu, benzenu a toluenu v průběhu celého období měření byly 0,09; 0,16 a 0,45 ppb. Za teplého slunečného dne byla prokázána vyšší emise isoprenu než benzenu a toluenu. Naopak za chladného oblačného dne byla koncentrace benzenu a toluenu vyšší než u isoprenu, přičemž koncentrace benzenu a toluenu se v obou variantách skoro nezměnily. Měnila se pouze koncentrace isoprenu a to tak, že byla za teplého slunečného dne skoro 6x vyšší. Mimo vegetační období je koncentrace isoprenu závislá na rychlosti větru a výšce vrstvy mísení. Příspěvek antropogenních emisí na koncentraci isoprenu se zdá být zanedbatelný v létě, a to zejména ve dnech s vysokými teplotami vzduchu a s dobře promíchanými mezními vrstvami. [5]

## **3 Reakce BVOC**

Nejvýznamnější interakce mezi ovzduším a rostlinami probíhá přes průduchy v listech. Činnost průduchů je regulována podmínkami prostředí (ozářeností, koncentrací oxidu uhličitého, dostupností vody) a biochemickou aktivitou listů. Klimatické podmínky a specifické druhové složení ovlivňuje absorpci a emisi plynů vegetací. Kvalita a kvantita látek vstřebaných nebo naopak emitovaných porostem se tak liší v závislosti na druhu, klimatických podmínkách (teplota, ozářenost apod.) a koncentraci znečišťujících látek v ovzduší. V různých studiích bylo ukázáno, že určité druhy jehličnanů nebo obecně druhy stromů s komplexním listovým systémem mají vyšší kapacitu pro příjem znečišťujících látek. Význam emisí biogenních těkavých organických látek do ovzduší souvisí s reaktivitou těchto sloučenin s některými sloučeninami uvolňovanými z antropogenních vlivů, zejména s oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ . [7]

Emise biogenních těkavých organických látek jsou druhově specifické, takže fotochemické reakce záleží právě na biologické rozmanitosti porostů. Většina biogenních těkavých organických látek emitovaných rostlinami patří do skupiny isoprenoidů. Mezi nejvíce zastoupený z řad isoprenoidů patří isopren (2-methyl-1,3-butadien), jež je nejjednodušší a zároveň nejvíce těkavý isoprenoid tvořící základ všech isoprenoidů, monoterpenů, seskviterpenů až polyterpenů. Emise isoprenu tvoří poloviční emisi všech BVOC a je srovnatelná s celkovou emisí methanu ze všech zdrojů.[7]

Například, rozšířené listnaté druhy, jako je topol a vrba, emitují převážně isopren, zatímco jehličnany, jako je borovice, obecně emitují monoterpeny. Nicméně je i několik výjimek. Příkladem je jedle emitující isopren a monoterpeny i přesto, že je jehličnan. Také u listnatých stromů jsou druhy, jako dub pýřitý nebo dub letní, které silně emitují isopren. Na druhou stranu z řad dubů například dub cesmínovitý nebo dub korkový silně emituje monoterpeny. Úplnou výjimkou mezi duby je dub cer, který je považován za neemitující BVOC. Výběr emitujících a neemitujících druhů může zásadně ovlivnit spouštění fotochemických reakcí, tedy tvorbu ozonu. Stimulaci emise BVOC, hlavně isoprenoidů, ovlivňují vysoké teploty, oxidační stresové podmínky a patogenní útoky. Vznik isoprenoidů v rostlinách je velice obtížný, ale díky němu rostlina více odolává teplotnímu stresu a má vyšší antioxidační kapacitu. Úloha isoprenoidů v ochraně rostliny vůči teplotním stresům je důležitá zejména v místech s umělou infrastrukturou, kde mohou teploty dosáhnout vysokých hodnot. Zároveň isoprenoidy mohou chránit rostlinu před vysokými koncentracemi ozonu. Emise isoprenoidů může rostlinám pomoci ke snižování stresu, na druhou stranu právě tyto látky mohou katalyzovat fotochemické cykly, které způsobují znečištění ovzduší.[7]

Podle výzkumu ve Finsku jsou emise monoterpenů v létě výrazně vyšší než v zimě. Nejnižší měsíční průměry byly naměřeny v březnu, kdy fotochemie hrála v ovzduší důležitou roli, ale biogenní emise nebyly tak vysoké, jako na konci jara a v létě. Koncentrace většiny monoterpenů začaly vzrůstat už v dubnu. Nejvyšší koncentrace isoprenu byly měřeny v červenci, nejnižší pak na jaře (březen, duben a květen).[8]

### 3.1 Ozon

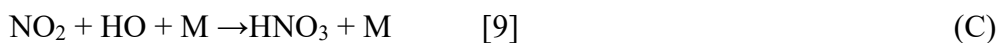
Ozon objevil Christian Friedrich Schönbein roku 1840 při elektrolýze vody, kdy ucítil charakteristický zápach a usoudil, že se jedná o novou sloučeninu. Sloučenina dostala pojmenování z řeckého ozein, což znamená zapáchat, cítit. Koncentrace ozonu jsou vyjadřovány v Dobsonových jednotkách (DU). 1 DU je množství ozonu, které by za standardních podmínek vytvořilo ve vertikálním sloupci vrstvu 0,01 mm. Důležité nukleové kyseliny a makromolekuly potřebné k životu jsou ničeny UV zářením. Stratosférický ozon je důležitou složkou v atmosféře chráníci před dopadem UV záření na Zem. Ačkoli je ozon přírodní složkou spodní vrstvy atmosféry, je také důležitou složkou městského a regionálního fotochemického znečištění ovzduší. Reakce zahrnující těkavé organické látky a oxidy dusíků pocházející z lidské činnosti s příspěvkem sluneční energie, vedou k formování ozonu a jeho oxidantů, které jsou typické pro městské oblasti v mnoha částech světa. Hodnoty stratosférického ozonu se v atmosféře pohybují okolo 0,5-10 ppm. Hodnoty troposférického ozonu jsou nižší, pohybují se okolo 0,01-0,2 ppm. [9]

Proudění UV záření v kombinaci s ozonem a vodní parou může být potenciálním zdrojem hydroxylových radikálů ( $\cdot\text{OH}$ ) dle reakce:



Volné hydroxylové radikály reagují téměř se všemi molekulami emitovanými do ovzduší. Životaschopnost znečišťujících látek v ovzduší je stanovena jejich reaktivitou vůči OH radikálům. [9]

Příkladem může být reakce OH radikálu s oxidem dusičitým za vzniku kyseliny dusičité.



Vznik OH radikálu je základním mechanismem, kterým dochází k odbourávání znečišťujících látek z atmosféry. [9]



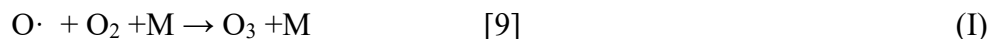
Vznik stratosférického ozonu byl popsán roku 1930 Chapmanem takto:



M – molekula stabilizující ozon a absorbující přebytečnou energii ( $\text{N}_2, \text{O}_2$ )

Atom kyslíku pochází z fotodisociace  $\text{O}_2$ . [9]

V roce 1952 Blacet uznal, že fotolýzou  $\text{NO}_2$  ve znečištěném ovzduší může docházet ke vzniku troposférického ozonu.



Takto vytvořený ozon může následně reagovat s oxidem dusnatým za vzniku oxidu dusičitého.



### 3.2 Tvorba ozonu

Ozon je vnášen do troposféry vířivými toky ze stratosféry, ale je také vytvářen pomocí fotochemické reakce v troposféře působením antropogenních a biogenních VOC a oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) za přítomnosti slunečního záření. Fotolýzou ozonu se vytváří malé množství OH radikálů. Při reakci organických těkavých látek s OH radikály dochází nejprve k jejich rychlé oxidaci na peroxy radikály a současně se oxid dusnatý NO převede na oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ . Dalšími produkty této reakce jsou hydroperoxylový radikál ( $\text{HO}_2\cdot$ ) a karbonylové sloučeniny typu aldehydů a ketonů. Produkce ozonu závisí na poměru koncentrace volatilních organických látek a oxidů dusíku. Potenciál vzniku ozonu u terpenů a isoprenů může být definovaný jako gram ozonu vznikající na gram molekuly těkavé organické látky. [7]

Poměr mezi organickými těkavými látkami a oxidy dusíku můžeme rozdělit na VOC - omezenou zónu ( $\text{VOC} / \text{NO}_x < 4$ ), optimální produkční oblasti ozonu ( $15 > \text{VOC} / \text{NO}_x > 4$ ) a  $\text{NO}_x$  - omezenou zónu ( $\text{VOC} / \text{NO}_x > 15$ ). Produkce ozonu v oblasti s omezenými podmínkami pro VOC je velmi vysoká díky vysoké koncentraci  $\text{NO}_x$ . Na druhé straně produkce ozonu v oblasti s omezenými podmínkami pro  $\text{NO}_x$  se běžně vyskytují na venkově, kde je produkce ozonu omezena nízkou koncentrací  $\text{NO}_x$ . Optimální podmínky pro vznik ozonu jsou v přechodech zón, kterými mohou být například příměstské oblasti. Při úvahách o snižování emisí prekurzorů tvorby ozonu v krajinném plánování je při rozsáhlé výsadbě stromů nutno brát v potaz potenciál druhů pro emise BVOC. U druhů, které emitují isopren, jakožto nejrozšířenější isoprenoid, byl reaktivní faktor stanoven na  $9,1 \text{ g O}_3 \cdot 1 \text{ g}^{-1} \text{ VOC}$ . U druhů, které nejčastěji emitují  $\alpha$ -pinen z řad monoterpenů, byl reaktivní faktor stanoven na  $3,3 \text{ g O}_3 \cdot 1 \text{ g}^{-1} \text{ VOC}$ . K emitování isoprenu dochází ve dne, naopak k uvolňování terpenů v noci. Emisní faktor se může měnit v rámci rostlinných druhů, ale také v důsledku počasí, rostlinné fyziologie a ontogeneze, proto je třeba dbát zvýšené opatrnosti také při výběru nízkoemitujících druhů rostlin. Důvodem je zvýšení emise BVOC rostlinami při působení stresujících faktorů, jako jsou vysoké teploty, sucho a přítomnost oxidačních látek.[7]

### ***3.3 Snižování koncentrace ozonu rostlinami***

Realistické odhady odbourání a produkce ozonu vzhledem k zeleni jsou poměrně nejisté a náročné. Ovšem s velkou pravděpodobností v místech, kde nedochází k omezování fyziologie rostlin klimatickými podmínkami, pohlcení ozonu rostlinami převažuje nad ozonem potencionálně vytvořeným BVOC. V suchých podmínkách, jako jsou například ty, které se často vyskytují v oblastech Středomoří, je vychytávání ozonu výrazně snižené až zanedbatelné. Naopak dochází k vysoké produkci BVOC, což v kombinaci se slunečním zářením, typickým pro tyto oblasti, vede k tvorbě ozonu. Ve znečištěném prostředí může být role BVOC ještě důležitější, kvůli vysoké koncentraci  $\text{NO}_x$  pocházejících především z antropogenních zdrojů. Za takových podmínek je volba rostlin s nízkou emisí BVOC zásadní pro snížení potenciálu vzniku ozonu. [7]

Nedávne experimenty prokázaly, že zavádění ozonu do mezofylu způsobuje oxidaci buněčných stěn, poškození fotosyntetického aparátu s nežádoucími účinky na rychlost růstu, produkci biomasy a urychluje stárnutí listů. Při vysoké koncentraci ozonu má vodivost a tok ozonu v průduších listů nelineární závislost, z čehož vyplývá hromadění ozonu v mezibuněčných prostorech. Po vstupu ozonu přes průduchy do rostlin rychle vzniká reaktivní kyslík ( $O_2^{\cdot-}$ ,  $OH^{\cdot}$ ,  $H_2O_2$ ), který se snaží rostliny odstranit pomocí katabolických procesů řízených rostlinami v důsledku abiotického stresu. Pokud nedochází k odbourávání ozonu rostlinami uvnitř listů, dochází k povrchové adsorpci a následnému ukládání do pudy, kmene, kůry a obecně jakéhokoliv místa vnějšího povrchu. Na mokřích površích může značné množství ozonu reagovat s vosky, solemi, ionty a s mnoha dalšími rozpuštěnými látkami. Bylo prokázáno, že u vysoké produkce isoprenoidů dochází hlavně k reakcím mezi plynnou fází a ozonem **bez průduchů v listech**. [7]

## 4 Vliv podmínek prostředí na emisi BVOC

Jak již bylo řečeno, emise BVOC je závislá na mnoha faktorech. Tato kapitola bude pojednávat o vlivech teploty, ozáření, koncentraci oxidu uhličitého a oxidů dusíku na emisi BVOC.

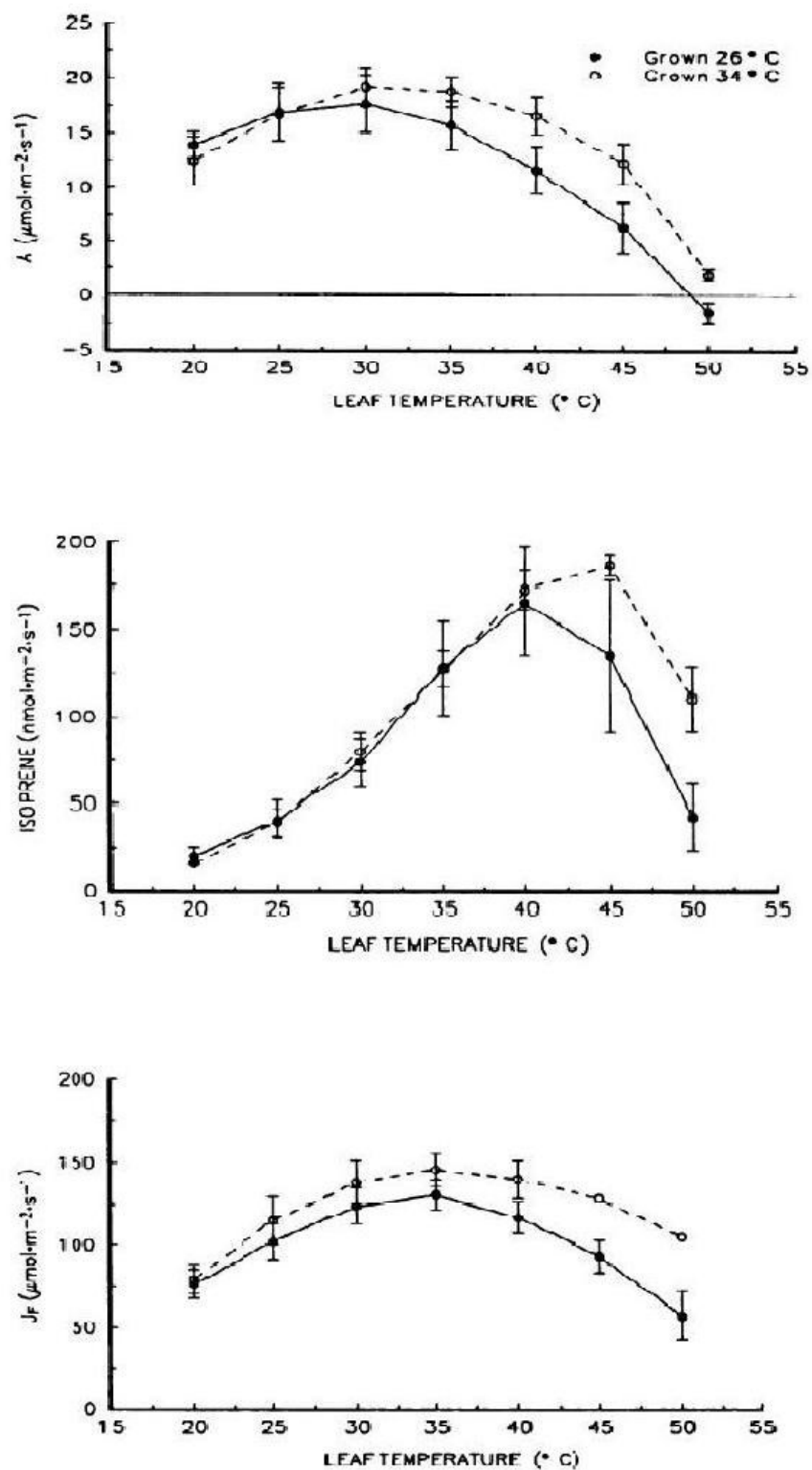
### 4.1 *Emise isoprenu z listů v závislosti na teplotě*

Z první studie teplotní závislosti emise isoprenu z listů byla prokázána silná odezva na teplotu listů. Posledním krokem syntézy isoprenu je přeměna 3,3-dimethylallyl-difosfátu enzymem isopren-syntázou. Pokud je hladina 3,3-dimethylallyl-difosfátu poměrně vysoká, pak teplota bude mít na emisi isoprenu velký vliv. Množství 3,3-dimethylallyl-difosfátu roste s teplotou spolu s aktivitou isopren-syntázy. Afinita enzymu k substrátu může záviset na teplotě. Například afinita enzymu Rubisco k oxidu uhličitému se s teplotou zvyšuje, zatím co pro afinitu ke kyslíku teplota nehraje zásadní roli.[10]

Přibližně nad 35 °C je míra emise isoprenu proměnlivá. Měření 3,3-dimethylallyl-difosfátu ukazují, že proměnlivost je způsobena spíše dostupností 3,3-dimethylallyl-difosfátu, než nestabilitou proteinu isopren-syntázy. Nejenže je emise isoprenu vyšší v teplém počasí nebo teplém podnebí, než v chladném počasí nebo v chladném podnebí, je vyšší v proměnlivém počasí, než v ustáleném počasí. [10]

Emise isoprenu se vzrůstající teplotou až do 45 °C roste, po dosažení této teploty dochází k poklesu emisí isoprenu z rostlin (Obr. č. 1.). Experiment byl proveden na dvou rostlinách *Mucunapruriens* (Kapikacchú, sametové fazole) v závislosti na teplotě. Jedna rostlina byla pěstována při teplotě 26 °C a druhá při teplotě 34 °C. [11 ]

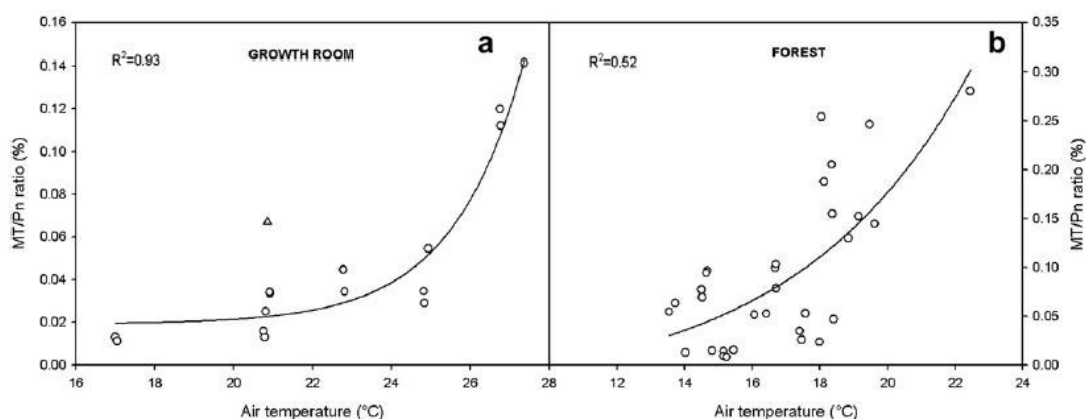




Obr. č. 1. Závislost fotosyntetické asimilace, emise isoprenu a rychlosti transportu elektronů na teplotě listů. [11]

Z Obr. č. 1. je patrné, že fotosyntetická asimilace (A) rostliny pěstované při teplotě 34 °C je vyšší, než pro rostlinu, který byla pěstována při nižší teplotě. Emise isoprenu pro obě rostliny do teploty listů 40 °C téměř korelují, rozdíl nastává až po překročení této teploty. Nejvyšší emise isoprenu pro rostlinu pěstovanou v chladnějším prostředí (26 °C) byla při teplotě listů 40 °C a to cca 160 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Rostlina pěstovaná v teplejším prostředí (34 °C) dosáhla nevyšší emise isoprenu při teplotě listů 45 °C a to cca 180 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Po překročení těchto teplot emise isoprenu u obou sledovaných rostlin klesala. Pro obě rostliny byla rychlost elektronového transportu (J<sub>F</sub>) nejvyšší při teplotě listů 35 °C. Pro rostlinu pěstovanou v chladnějším prostředí (26 °C) maximum činilo cca 125 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. U rostliny pěstované v teplejším prostředí (34 °C) bylo maximum cca 145 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. [11]

U dospělých buků bylo prokázáno, že asimilovaný uhlík reemitují zpět do atmosféry ve formě monoterpenů ve větší míře, než buky mladé. Z experimentu vyplynulo, že fotosyntéza a emise monoterpenů z buku jsou závislé na ozářenosti pouze s kolísající teplotou. Světelná závislost je spíše spojená s aktivitou specifické syntázy a s dostupností substrátu (1-deoxy-D-xylulose-5-fosfátu). Poměr uhlíku emitovaného a asimilovaného (monoterpeny/fotosyntéza) ukázal srovnatelné výsledky pro krátkodobé teplotní změny jak pro mladé buky pěstované v komorách, tak pro dospělé stromy stejného druhu v lese. S rostoucí teplotou vzduchu se tento poměr exponenciálně zvyšoval, tj. narůstala emise uhlíku ve formě monoterpenů v poměru k uhlíku asimilovanému při fotosyntéze, jak vyplývá z Obr. č. 2. [12]



**Obr. č. 2. Závislost uhlíkového poměru (monoterpeny/fotosyntéza) na teplotě mladého buku pěstovaného v růstové komoře za řízených podmínek (a) a dospělého buku v lese za přirozených podmínek (b). [12]**

## ***4.2 Emise isoprenoidů v závislosti na ozáření***

Z experimentu se slunečnicemi vyplývá silná závislost emise isoprenoidů na ozáření. Emise isoprenu je významná zejména přes den, kdy je světelný tok na rostlinu vysoký. V noci naopak dochází k pozastavení emise. U terpenů z buku dochází také k ovlivnění emisí ozářením, ale není to tak jednoznačné, záleží na druhu emitované látky. Například emise sabinenu z buku za tmy je téměř nulová a dochází k zrychlování toku emisí se zvyšující se intenzitou světla. U emise  $\alpha$ -pinenu z buku je závislost emisí na intenzitě světla mnohem nižší. Bez světelného toku je rychlost terpenické biosyntézy nízká, předpokládá se difúze mono a seskviterpenů ze zásobních buněk. Kombinací intenzity světelného toku a teploty můžeme dosáhnout změn v stomatální vodivosti, rychlosti transpirace a rychlosti fotosyntézy.[13]

## ***4.3 Emise isoprenu v závislosti na koncentraci oxidu uhličitého***

Oxid uhličitý může mít vliv na emisi isoprenu nejméně třemi způsoby. Prvním způsobem je okamžitý účinek na rychlost emise isoprenu z listů. Druhým případem je ovlivnění kapacity pro emisi isoprenu z listů rostlin, což bylo ukázáno na rostlinách pěstovaných v různých koncentracích oxidu uhličitého. Třetí jsou účinky oxidu uhličitého na celkový růst porostu, což má zpětně vliv také na rychlost emitace isoprenu.[10]

Krátkodobý účinek oxidu uhličitého může být významný při nízké až střední teplotě. Při vyšších teplotách významnost klesá a může v některých případech při teplotě 35 °C vymizet. Typickým zástupcem tohoto jevu je dub červený. Produkce isoprenu požaduje jeden pyruvát pro každých pět uhlíku přeměněných na isopren. [10]

V prostředí bez CO<sub>2</sub> je emise isoprenu o trochu nižší, než při dosažení kompenzačního bodu CO<sub>2</sub>. Je to přičítáno nedostatku přísunu uhlíku do glycerinaldehyd-3-fosfátu (GAP) nebo pyruvátu (konjugovaná zásada kyseliny pyrohroznové) a zásobováním deoxyxylulozy uhlíkem, jakožto zdroje uhlíku pro 2-C-methylerythritol-4-fosfát (MEP) prostřednictvím něhož vzniká isopren, což vede ke zvýšení emisí isoprenu v prostředí bez CO<sub>2</sub>. Nad kompenzačním bodem emise isoprenu klesá s rostoucí koncentrací oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> i přesto, že asimilace CO<sub>2</sub> stoupá.[10]

Příliš vysoká koncentrace CO<sub>2</sub> má výrazný dopad na emise isoprenu z porostů. Opakovaně bylo pozorováno, že při zvýšené koncentraci CO<sub>2</sub> dochází k poklesu emisí isoprenu z rostlin. Ve skutečnosti se očekávalo, že s rostoucí koncentrací CO<sub>2</sub> bude efektivnější fotosyntéza způsobující zvýšení emisí těchto isoprenoidů, jež vznikají během fixace uhlíku. Avšak produkce isoprenu se zdá být omezena nedostatkem fosfoenolpyruvátu nebo podobných látek používaných v konkurenčních respiračních procesech. Emise terpenů byla téměř shodná pro nízkou i vysokou koncentraci CO<sub>2</sub>. Z toho vyplývá ovlivnitelnost emisí pouze isoprenu, nikoli terpenů.[14]

#### ***4.4 Emise isoprenu v závislosti na koncentracích oxidů dusíku***

Listy rostlin, které se vyvíjely a byly vystaveny vysoké teplotě a účinku dusíkatých hnojiv, zvyšují rychlost emise isoprenu. Hnojení dusíkem může mít přímé i nepřímé dopady na emise isoprenu. Přímé účinky mohou být spojené s tvorbou produktů fotosyntézy použitých v biosyntéze isoprenu. Nepřímé účinky jsou spojeny s rozvojem indexu listové plochy. V obecném měřítku je možné říci, že dochází také ke zvýšení emisí isoprenu v důsledku dopadu vzdušného dusíku na ekosystémy.[10]

V budoucnu bude míra emisí isoprenu ovlivněna fyziologickými změnami v listech, korunách stromu, změnami klimatu, koncentrací oxidu uhličitého a změnami ve využití půd. Koncentrace isoprenu je vysoce ovlivněna teplotou, což naznačuje zvýšení emise isoprenu v budoucnu, ale k vyvážení může dojít snížením koncentrace isoprenu díky vyšší koncentraci oxidu uhličitého. [10]

## 5 Měření BVOC

Pro analýzy biogenních těkavých organických látek se v dnešní době nejčastěji používá adsorpce na tzv. sorbenty. Pro měření biogenních těkavých organických látek se využívá několik typu sorbentů. Mohou být vyrobeny z přírodních materiálů (zeolity), uhlíkatých materiálů (Carbotrap) anebo mohou být založeny na polymerní struktuře (Tenax).[2]

### 5.1 Historie měření BVOC

Za první měření se považuje stanovení biogenních těkavých organických látek Rasmussenem a Wentem roku 1964, kdy bylo sledováno množství terpenů emitovaných z lesa. Toto měření přineslo zjištění, že pro množství emisí těchto látek je důležité stádium vývoje rostliny, meteorologické podmínky a také zásahy do ekosystému člověkem. První analýza byla uskutečněna nástřikem do plynového chromatografu s náplňovou kolonou. Složení analyzované plynné směsi bylo stanoveno na plamenově - ionizačním detektoru. V tomto výzkumu byl prokázán výskyt nejen terpenů, ale i isoprenu v ovzduší. Sorbenty jako první využil Hedin. K desorpci analyzovaných látek následně dochází použitím rozpouštědel nebo tepla, Hedin použil desorpci pomocí rozpouštědel. V roce 1979 Holdrén použil tepelně desorpční metodu pro stanovení isoprenoidů v ovzduší. Jako sorbent se od druhé poloviny osmdesátých let začal používat Tenax GC, který byl pro své nestandardní chování nahrazen tepelně kondiciovaným Tenaxem (Tenax TA).[2]

Sorbenty Tenax patří mezi syntetické látky, jejichž úpravou lze docílit požadovaných vlastností. Po chemické stránce se jedná o poly-2,6-difenyloxy-p-fenylenoxid. Tenax TA má specifický povrch  $35 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , objem pórů činí  $2,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , průměrná velikost pórů je 200 nm a hustotou  $0,25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Tenax TA je polymer teplotně stabilní až do 350 °C. Právě díky těmto vlastnostem a jeho chemické čistotě se používá nejčastěji k analýzám BVOC.[15]

## **5.2 Metoda vzorkování na sorbent**

Pro záchyt analyzovaných látek na sorbent se používají dvě metody. V první metodě se prosává pouze takové množství analyzované plynné látky, aby nedošlo k eluci nejtěkavější složky ze sorbentu. V druhém typu metody se prosává takové množství analyzované plynné látky, až dojde k ustálení koncentrace analyzovaných látek jak v proudu vzduchu, tak na povrchu sorbentu.[16]

Zvolení vhodného druhu sorbentu hraje významnou roli při adsorpci analyzovaných látek. Množství látky, které bude na sorbentu zachyceno, závisí na okolních podmínkách (tlak, teplota, vlhkost, koncentrace), rychlosti prosávání analyzované látky a na množství sorbentu. Aby nedocházelo k úniku analytů ze sorbentu (eluaci) je důležitým parametrem specifický retenční objem. Ke zlepšení vlastností sorbentů může pomoci jejich vhodná kombinace. Vhodný sorbent je ve finále vybrán podle druhu těkavých organických látek, jež mají být měřeny. Aktivní metoda vzorkování umožňuje kontrolu rychlosti a doby vzorkování. Používají se pumpy, které vhánějí přes trubičku se sorbentem analyzovanou plynnou směs. U pasivní metody vzorkování dochází k volnému toku analyzovaných látek přes sorbent, dokud není dosaženo rovnováhy koncentrací vstupujících a zachycených látek, nebo není zastaven člověkem, který analýzu provádí.[16]

Pokud se jedná o neznámou směsici látek, je nutné zvolit kompromis v rychlosti a objemu prosávání látek trubičkami naplněnými sorbentem. Jako optimální se jeví prosávání analyzovaných látek trubičkou se sorbentem při průtoku 0,5 l za minutu po dobu 20 minut.[17]

## **5.3 Chromatografie**

Chromatografie je metoda umožňující dělení směsi a stanovení jak kvalitativního tak kvantitativního zastoupení látek ze vzorku. Metodu lze použít k izolaci látek ve velmi čistém stavu, analytickým kontrolám, přečištění chemických látek apod. Uplatnění chromatografie je v mnoha odvětvích, například ve farmakologii, ale i v monitoringu složek životního prostředí. Základním principem metody je rozdílná afinita složek vzorku unášených mobilní fází k fázi stacionární.[18]

### 5.3.1 Plynová chromatografie

Metoda je založena na dělení směsi o rozdílném bodu varu a rozdělovacím koeficientu. Analýza se provádí na tzv. plynových chromatografech. Tato technika je využívána v případě, kdy všechny analyzované látky lze převést do plynného skupenství zahřátím na pracovní teplotu kolony. Jako mobilní fáze se zde využívá nosný plyn, do kterého se zavádí analyzovaný vzorek. V koloně dochází k separaci složek na základě rozdílné schopnosti poutat se na fázi stacionární. Po přechodu kolonou dochází k detekci nosného plynu. Jako nosný plyn se nejčastěji používá vodík, dusík, helium anebo argon. Volba vhodné mobilní fáze závisí na viskozitě, účinnosti, čistotě, reaktivitě, typu použitého detektoru, ale také na ceně nosného plynu. Kolony v chromatografu představují prostor, kde je umístěna stacionární fáze. Rozeznáváme náplňové a kapilární kolony. Důležitým faktorem v plynové chromatografii je teplota. Pokud teplotu udržujeme na konstantní hodnotě, jde o isotermální analýzu. U analýzy látek s rozdílnými body varu je vhodnější použít teplotního gradientu, tzn. měnit teplotu dle vytvořeného teplotního programu během analýzy. Výhodou druhého zmíněného typu je zkrácení doby analýzy a zvýšení citlivosti metody. Důležitým faktorem volby stacionární fáze je polarita separovaných složek. Pro separaci polárních a nenasycených molekul se využívají středně polární kapilární kolony.[18]

V **detektorech** dochází k detekci analyzovaných látek. Detektor reaguje na přítomnost analyzované složky v mobilní fázi a vysílá signál do vyhodnocovacího zařízení. Rozeznáváme několik hlavních typů detektorů. **Tepelně vodivostní detektory** (TCD) jsou založeny na ochlazování žhaveného vlákénka při proudění nosného plynu. Ke změně teploty vlákna dochází vlivem změny tepelné vodivosti prostředí díky přítomnosti analyzované složky. Změna teploty má za důsledek změnu elektrického odporu vlákna. Důležitým faktorem je volba nosného plynu, který by měl mít tepelnou vodivost co nejvíce odlišitelnou od analyzovaných látek. Tento detektor má využití zejména pro detekci anorganických plynů a organických nízkomolekulárních látek. **Ionizační detektory** jsou založeny na vedení elektrického proudu v plynech. Základní částí je izolovaná nádoba s dvěma kovovými deskami (elektrody) mezi nimiž je elektrické pole. Přes elektrody proudí plyn. Mezi ionizační detektory řadíme plamenový ionizační detektor (FID), plamenově ionizační detektor s alkalickým kovem (AFID), bezplamenový ionizační detektor s alkalickým kovem (TID), detektor elektronového záchytu (ECD), fotoionizační detektor (PID).

Nezastupitelné je spojení chromatografu s **hmotnostním spektrometrem** (MS). Při této identifikaci lze získat pro každou složku analyzované látky hmotnostní spektrum a následně jej porovnat v databázi spekter látek uložené v počítači.[18]

**Vyhodnocovací zařízení** zpracovává signál jdoucí z detektoru a vytváří tzv. chromatogram. Jde o grafický záznam závislosti napěťové odezvy na čase. Z časového záznamu píků se vyhodnotí kvalitativní a kvantitativní zastoupení složek analyzované látky. Kvantitativní zastoupení složky je určeno plochou uzavřenou jedním píkem.[18]

**Retenční charakteristiky** se využívají v kvalitativní analýze k určení konkrétní složky pomocí jejího retenčního nebo redukováného retenčního času. Retenční čas je doba, kterou stráví molekula složky v koloně. Tuto dobu lze rozdělit na mrtvý retenční čas (čas strávený v mobilní fázi) a na redukováný retenční čas (čas strávený ve stacionární fázi). Retenční čas je roven mrtvému retenčnímu času v případě inertního plynu nepoutajícího se na stacionární fázi. [18]

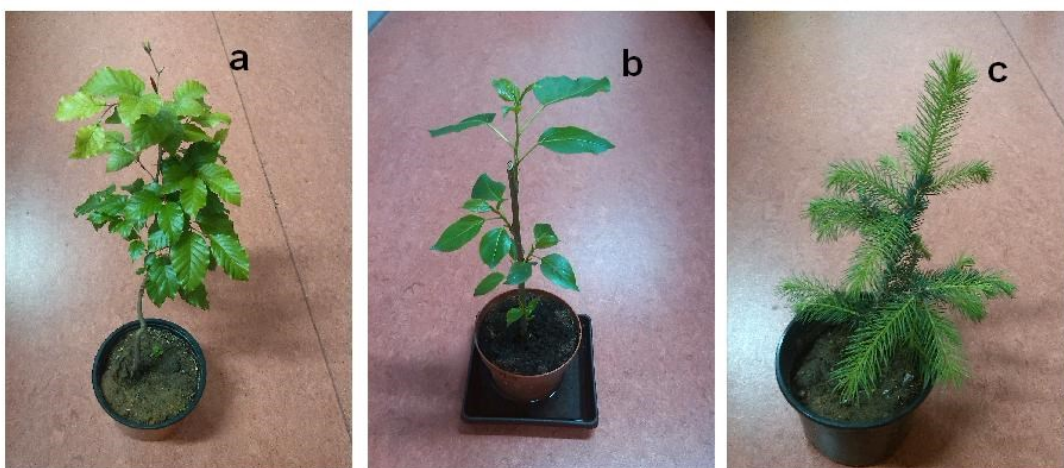
## **5.4 Adsorpce**

Adsorpce je jev, ke kterému dochází na styku dvou fází. Na rozhraní těchto fází dochází ke změnám koncentrací látek vzhledem k původnímu stavu. Látky rozpuštěné v jedné fázi se koncentrují na povrchu druhé fáze vlivem mezipovrchových sil. Podle povahy sil rozlišujeme adsorpci fyzikální a chemickou. U chemické adsorpce je adsorpční vazba pevnější než u fyzikální adsorpce. Takzvaná adsorpční izoterma pak vystihuje rovnovážný stav, který vznikne po určité době při styku sorbentu se směsí za konstantní teploty.[19]



## 6 Výběr rostlinných druhů a parametry měření

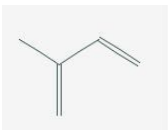
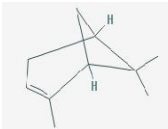
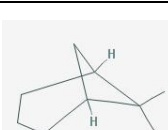
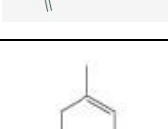
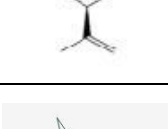

Z rostlinných druhů byl vybrán za zástupce z listnatých stromů buk lesní (*Fagus sylvatica*) a japonský topol (*Populus nigra* × *Populus maximowiczii*). Z jehličnanů byl vybrán jako zástupce smrk ztepilý (*Picea abies*). Na Obr. č. 3. jsou vyobrazeny stromy, které byly pro analýzu využity. Jedná se o semenáček stromu (smrk), dvouletý strom (buk) a řízek (topol) zasazené v substrátu pro výsev a množení s aktivátorem zakořeňování od firmy AGRO CS a.s.



Obr. č. 3. Zástupci rostlinných druhů: buk lesní (a), japonský topol (b), smrk ztepilý (c).

Všechny rostliny byly pěstovány při konstantní teplotě 16 °C, ozáření 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , relativní vlhkosti vzduchu 70 %, režim dne byl nastaven na 16 hodin a noc na 8 hodin. Jako měnící se parametry prostředí byla zvolena teplota v kombinaci s ozářeností (photon flux density - PFD). Měření probíhalo ve čtyřech podmínkových modelech: 22 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 22 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 35 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 35 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto parametry byly nastaveny pomocí gazometrického přístroje. Stanovovaly se tyto isoprenoidy: isopren,  $\alpha$ -pinen,  $\beta$ -pinen, limonen, camphen a 3-careen. (Tab. č. 1.). Jedná se o isoprenoidy, jejichž emise byla popsána v dostupné literatuře a jsou typické pro listnaté a jehličnaté stromy.[20,21]

Tab. č. 1. Přehled analyzovaných látek.[22]

Analyzovaná látka	Struktura	Chemický vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Bod tání (°C)	Bod varu (°C)
Isoprene		2-methyl-1,3-butadiene	68,117	-145,9	34
$\alpha$ - pinene		4,6,6-trimethylbicyclo-[3,1,1]hept-3-ene	136,234	-62,5	156
$\beta$ - pinene		2-methylenbicyclo-[3,1,1]heptane	136,234	-61,5	166
Limonene		p-mentha-(1,8)diene	136,234	-74	177,6
Camphene		2,2-dimethyl-3-methylenenorbornane	136,234	52	161
3- carene		3,7,7-trimethylbicyclo-[4,1,0]hept-3-ene	136,234	-	168-169

## 7 Odběr vzorků a jejich analýza

Odběr vzorků probíhal pomocí pumpy GilAir Plus (Sensidyne Gilian), která odsávala průtokem 200 ml vzduchu za minutu po dobu 30 minut vzduch okolo listů případně jehličí uzavřených v gazometrickém přístroji LI-6400XT (LI-COR, USA). Vzduch byl vháněn na tepelně kondiciovaný sorbent Tenax TA (80 mg) uložený ve skleněných sorpčních trubičkách. Odběrová aparatura je vyobrazena na Obr. č. 4.



Obr. č. 4. Odběrová aparatura. Vlevo se nachází gazometrický přístroj LI-6400 XT. List rostliny je uzavřen do komory tohoto zařízení, odkud je odsáván vzduch pomocí pumpy GilAir Plus přes sorpční trubičku naplněnou Tenaxem TA.

Při odběru BVOC z listů byly gazometrickým přístrojem současně zaznamenávány hodnoty rychlosti asimilace oxidu uhličitého ( $A_N$ ) a průduchové vodivosti ( $g_s$ ) po dobu celého vzorkování (30 min). List (nebo celá větvička v případě smrku) byl uzavřen do komůrky gazometru LI-6400 XT. Součástí přístroje je infračervený analyzátor plynů (IRGA), který je schopen identifikovat plyny v infračervené oblasti ( $CO_2$ ). IRGA je zařazen za vzorkovou i referenční kyvetou. Vzduch z okolní atmosféry prochází přes zásobníky s chemikáliemi, které je zbavují vodní páry a  $CO_2$ . Přístroj umožňuje nastavit libovolnou koncentraci  $CO_2$ , jehož zdrojem je externí zásobník  $CO_2$ . Vzduch s danou koncentrací  $CO_2$  pak prochází přes referenční a vzorkovou kyvetu a změna je detekována. Součástí přístroje je také světelný zdroj, který umožňuje nastavit požadovanou hodnotu ozáření, a regulátor teploty.

Sorpční trubičky byly následně podrobeny tepelné desorpci podle teplotního programu uvedeného níže na zařízení TurboMatrix 300 od firmy PerkinElmer, Inc. (USA). Samotná analýza probíhala na plynovém chromatografu Agilent Technologies 7890A GC od firmy Agilent Technologies, Inc. (USA). Pro analýzu byla zvolena kolona HP5 o rozměrech 30 m x 0,25mm x 0,25μm nepolárního charakteru s teplotním rozsahem od -60 °C až do 325/350 °C (složení kolony - z 5% fenyl a z 95% dimethylpolysiloxan). Jako hnací plyn bylo využito helium. Na výstupu z kolony byl připojen hmotnostní spektrometr Agilent Technologies 5975C insert XL MSD. Aparatura, na níž probíhaly analýzy vzorků je vyobrazena na Obr. č. 5.



**Obr. č. 5. Aparatura, na níž probíhaly analýzy vzorků: Hmotnostní spektrometr Agilent Technologies 5975C insert XL MSD (a), plynový chromatograf Agilent Technologies 7890A GC (b), termální desorber TurboMatrix 300 (c).**

Podmínky plynové chromatografické analýzy:

- Nosný plyn: helium, 08 ml·min<sup>-1</sup>
- Pec: 60 °C za 2 minuty  
10 °C za minutu na 120 °C  
30 °C za minutu na 250 °C výdrž 5 min.
- MS: scan 35–300 amu, solvent delay 0,5 minutu

Kalibrace byla provedena nástřikem standardního roztoku isoprenu a monoterpenů (ředěno do metanolu) přes vstřikovací spike zařízení termálního desorberu na trubičku s 80 mg Tenax TA, předem desorbovanou a kontrolovanou na slepý pokus.

Podmínky termální desorpce:

- Teploty:

Valve: 200 °C;

Primární desorpce: 250 °C za 5 min;

Trap: -15 °C;

Sekundární desorpce: 300 °C za 3 min;

Transfer Line: 200 °C

- Průtoky:

Desorpce: 20 ml·min<sup>-1</sup>;

Inlet Split: 15 ml·min<sup>-1</sup>;

Col.: 0,8 ml·min<sup>-1</sup>;

Out Split: 4 ml·min<sup>-1</sup>;

Analýzy byly provedeny za stejných podmínek jako kalibrace. Bylo provedeno měření pozadí a taktéž bylo ověřeno, že nedochází k průrazu analytů. Vyhodnocení, vzhledem ke komplikované matrici, bylo prováděno na iontu m/z 93, který je charakteristický pro analyzované terpeny a na iontu m/z 67, který je charakteristický pro isopren.

## 8 Vyhodnocení

Naměřené hodnoty byly přepočteny na požadované jednotky. Pro lepší orientaci byla z dat vytvořena tabulka, které obsahuje jak parametry prostředí při nichž se měřilo, tak hodnoty emisí látek pro topol japonský, buk lesní a smrk ztepilý (Tab. č. 2.) Z dat byly následně vytvořeny grafy, z nichž první dva poukazují na rychlost asimilace CO<sub>2</sub> a průduchovou vodivost (Obr. č. 6. (a), (b)), zbývající grafy (Obr. č. 7.; Obr. č. 8.; Obr. č. 9. (a),(b); Obr. č. 10.; Obr. č. 11.; Obr. č. 12.; Obr. č. 13. (a), (b)) se zabývají jednotlivými analyzovanými látkami.

Tab. č. 2. Souhrnná tabulka dat parametrů prostředí a analyzovaných látek.

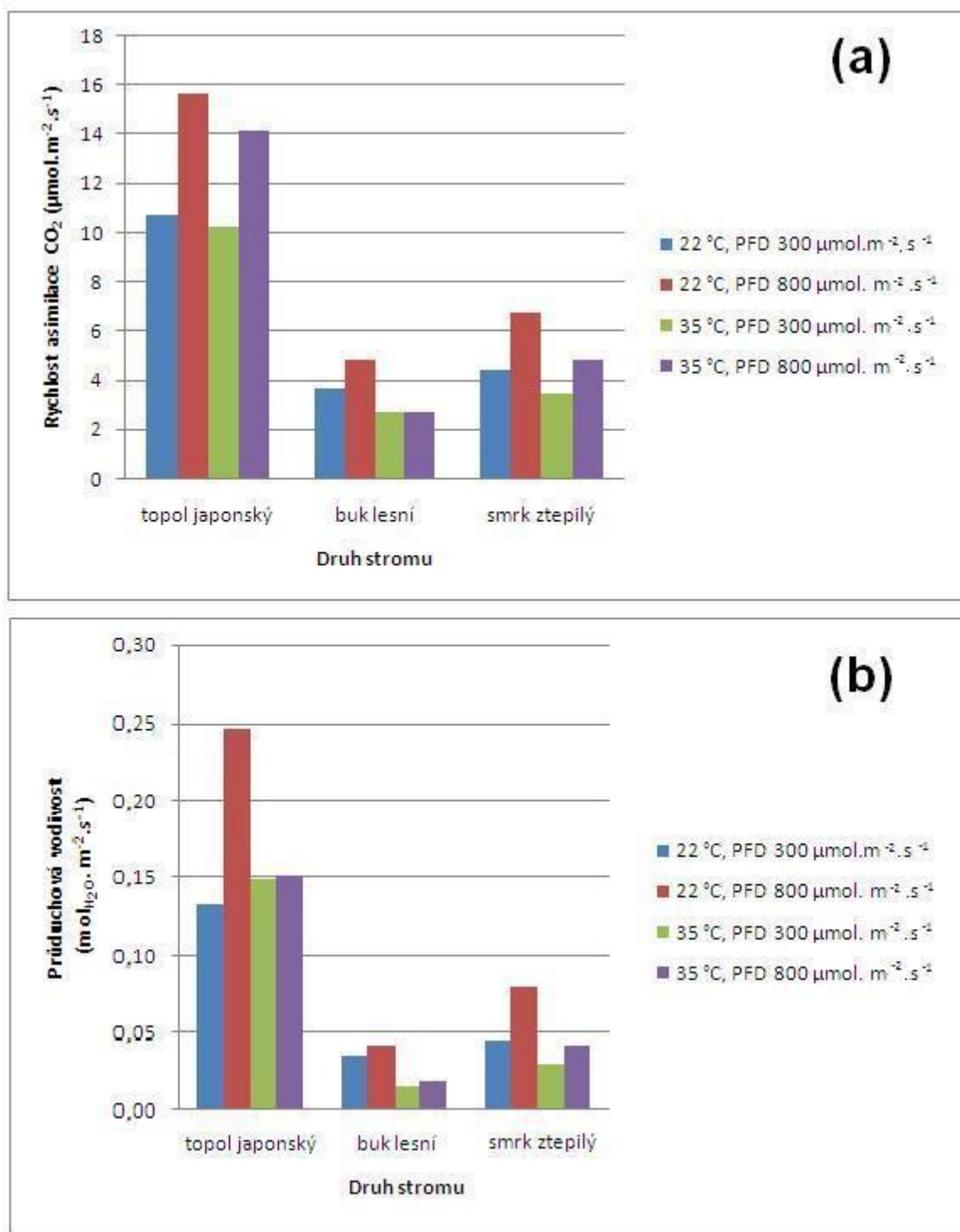
Strom	Ozářenost ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	$A_N$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$g_s$ ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Isopren*	$\alpha$ -pinen*	Camphen*	$\beta$ -pinen*	3-carene*	Limonen*	Celková emise monoterpénů*	Celková emise BVOC*
Topol	300	22	10,685	0,132	0,0132	1,6477	0,4126	0,5698	0,9087	2,6546	6,1934	6,2066
Topol	800	22	15,697	0,246	0,0169	0,9262	0,4447	0,461	0,3866	2,5406	4,7591	4,776
Topol	300	35	10,270	0,149	0,0437	0,2128	0,8301	1,0031	1,4694	2,9921	6,5075	6,5512
Topol	800	35	14,145	0,151	0,1136	4,1747	1,0253	1,8558	1,5833	3,1609	11,8	11,9136
Buk	300	22	3,668	0,036	0,0062	1,3444	0,1779	0,4986	0,9314	2,8401	5,7924	5,7986
Buk	800	22	4,827	0,043	0,0053	1,6031	0,168	0,5319	1,119	2,581	6,003	6,0083
Buk	300	35	2,672	0,016	0,0069	0,4017	0,1705	0,1405	0,1379	1,1004	1,951	1,9579
Buk	800	35	2,666	0,020	0,0053	0,7997	0,3557	0,4135	0,4069	2,7497	4,7255	4,7308
Smrk	300	22	4,419	0,045	0,0047	2,0745	1,0154	0,5025	0,9675	3,0444	7,6043	7,609
Smrk	800	22	6,764	0,080	0,0044	1,4986	0,4348	0,3581	0,798	3,1324	6,2219	6,2263
Smrk	300	35	3,407	0,030	0,0036	1,1574	0,6844	0,7004	0,4567	4,1258	7,1247	7,1283
Smrk	800	35	4,785	0,042	0,0053	1,7939	0,6967	0,7143	0,9132	5,9225	10,0406	10,0459

\* ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$A_N$  - rychlost asimilace  $\text{CO}_2$

$g_s$  - průduchová vodivost

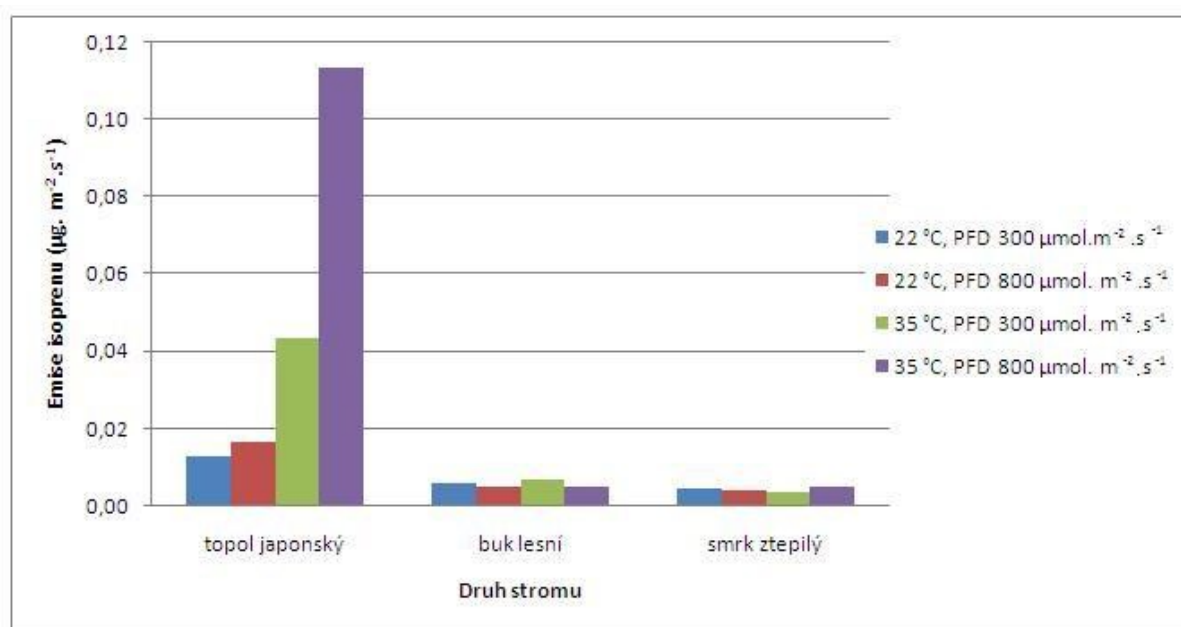




Obr. č. 6.  $A_N$  - rychlost asimilace CO<sub>2</sub> (a) a  $g_s$  - průduchová vodivost (b) topolu, buku a smrku. Fyziologické parametry byly měřeny gazometrickým systémem LI-6400 XT při čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> nebo 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

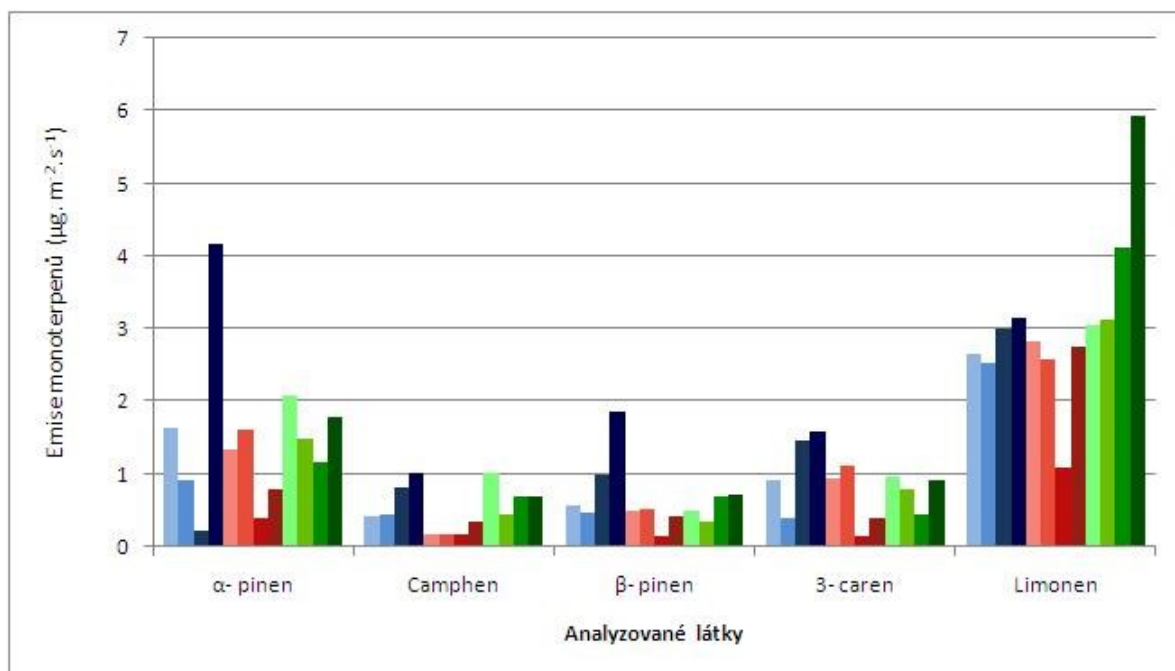


Nejvyšší rychlost asimilace  $\text{CO}_2$  byla naměřena u topolu japonského, což bylo očekáváno z důvodu toho, že se jedná o rychle rostoucí druh stromu, který asimilovaný uhlík využívá k tvorbě biomasy (Obr. č. 6. (a)). U všech druhů rychlost asimilace  $\text{CO}_2$  roste se vzrůstající ozářeností. I toto je v souladu s očekáváním, protože světlo dodává energii pro fotosyntézu. Naopak zvyšující se teplota  $A_N$  spíše snižuje; vzhledem k tomu, že rostliny byly aklimatizovány na teplotu  $16\text{ }^\circ\text{C}$ , lze předpokládat, že teplota  $35\text{ }^\circ\text{C}$  bude pro rostlinu již stresová. Průduchová vodivost ( $g_s$ ) víceméně kopíruje  $A_N$  (Obr. č. 6. (b)). Největší průduchovou vodivost listů vykazuje topol japonský. U všech sledovaných druhů se při vyšší ozářenosti průduchy otevírají, aby se zvýšil tok  $\text{CO}_2$  do listu; vyšší teplota má opačný efekt, rostliny průduchy uzavírají, aby omezily ztráty vody.



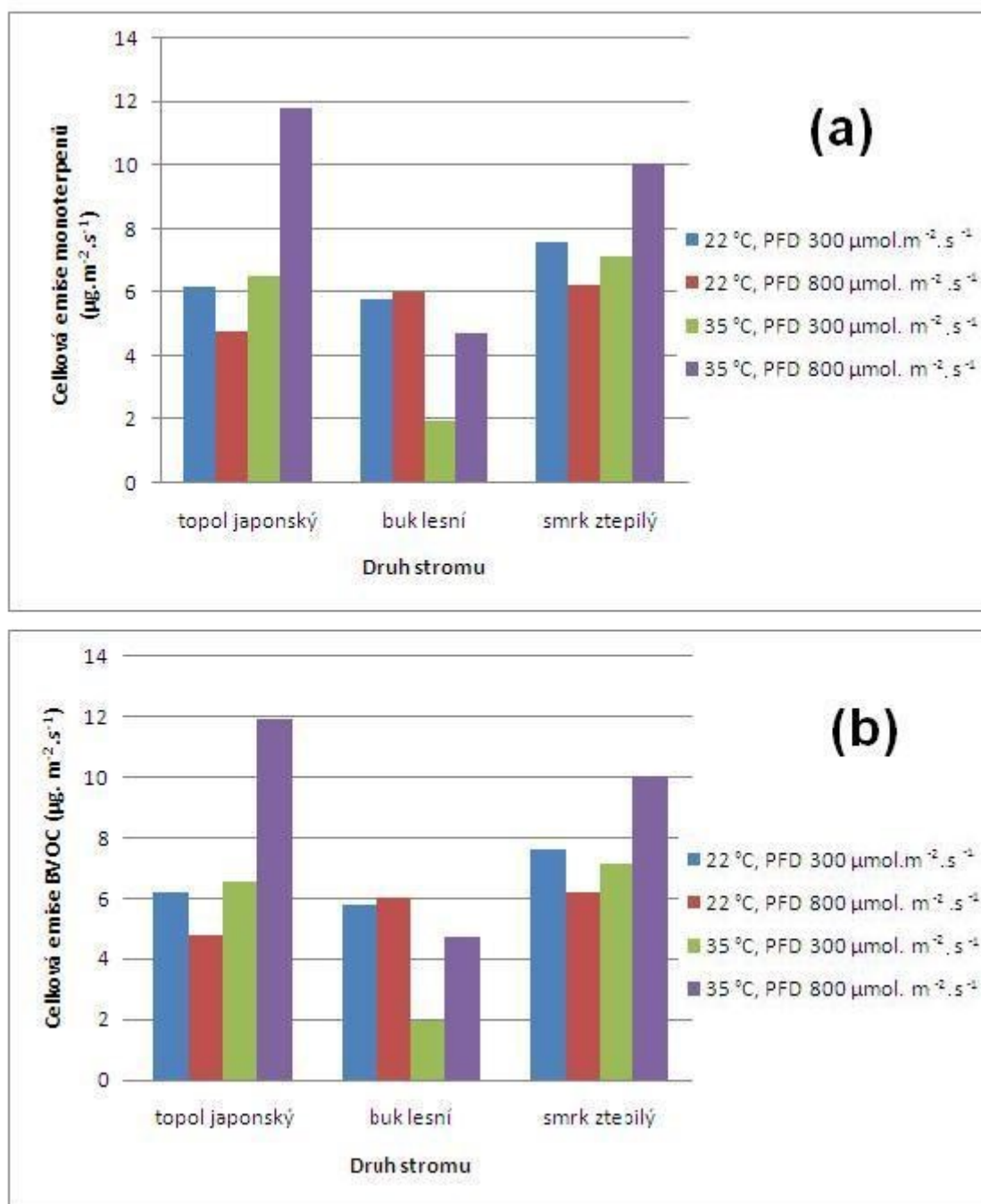
**Obr. č. 7. Emise isoprenu pro topol, buk a smrk. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty ( $22\text{ }^\circ\text{C}$  nebo  $35\text{ }^\circ\text{C}$ ) a ozářenosti (PFD  $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo  $800\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Isopren byl sorbován v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.**

Nejdominantnější emise isoprenu byla naměřena u topolu japonského (Obr. č. 7.). Emise isoprenu u tohoto druhu je silně posílena vzrůstající teplotou, ale i vzrůstající ozářeností; zejména při kombinaci teploty  $35\text{ }^\circ\text{C}$  a ozářenosti  $800\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  emise isoprenu strmě roste. Isopren je obecně emitován spíše listnatými než jehličnatými stromy.[7] Topol toto pravidlo potvrzuje, emise isoprenu u buku a smrku je však téměř shodná a celkově velmi nízká. V případě buku lze vysledovat mírný pokles emise isoprenu při zvýšení ozářenosti, zatímco zvýšení teploty vede k nepatrnému zvýšení emise isoprenu. Smrk ztepilý isopren téměř neemituje.



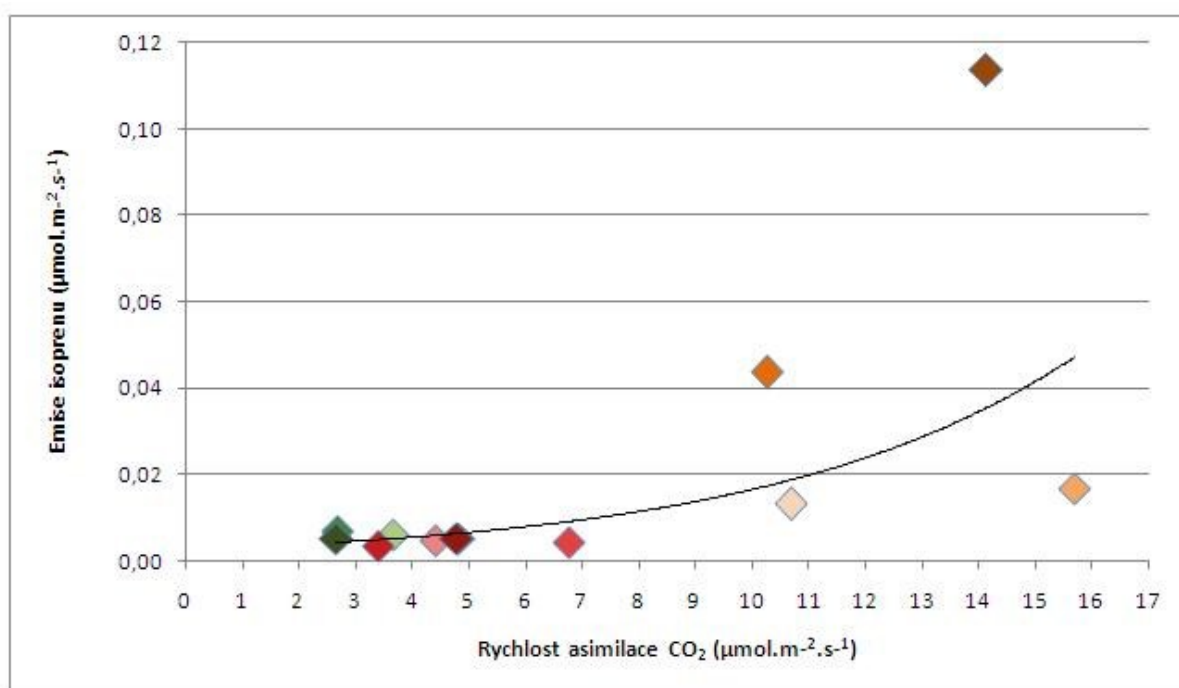
**Obr. č. 8.** Emise jednotlivých monoterpenů z topolu, buku a smrku. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Monoterpeny byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.

Na Obr. č. 8. jsou emise jednotlivých monoterpenů barevně odlišeny pro každý druh stromu. Topol je znázorněn modře, buk červeně a smrk zeleně. Sytost barvy udává následující parametry prostředí: nejsvětlejší - 22 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; světlá - 22 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; tmavá - 35 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; nejtmavší - 35 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nejhojněji je ze sledovaných látek v rámci všech druhů emitován limonen, následuje  $\alpha$ -pinen, 3-carene,  $\beta$ -pinen a camphen. Emise  $\alpha$ -pinenu je nejvyšší pro topol japonský, v těsném závěsu je smrk ztepilý a pak buk lesní. Toto je v rozporu s údaji nalezenými v literatuře, kdy se za nejvyšší emitory monoterpenů považují jehličnany. [7] Může to být způsobeno tím, že topol patří mezi rychle rostoucí druhy, u nichž jsou emise BVOC obecně vyšší. Emise camphenu i limonenu jsou nejvyšší pro smrk ztepilý, o trochu nižší emise je u topolu japonského a nejnižší emise těchto monoterpenů má buk lesní. Emise  $\beta$ -pinenu a 3-carenu jsou obdobné jako u emisí isoprenu, tzn. nejvyšší je pro topol japonský, následuje smrk ztepilý a buk lesní. Z topolu japonského a buku lesního byl nejvíce emitován limonen, následoval  $\alpha$ -pinen, 3-carene,  $\beta$ -pinen a camphen. U smrku ztepilého se pořadí liší pouze v posledních dvou látkách, nejnižší naměřená hodnota byla pro emisi  $\beta$ -pinenu.



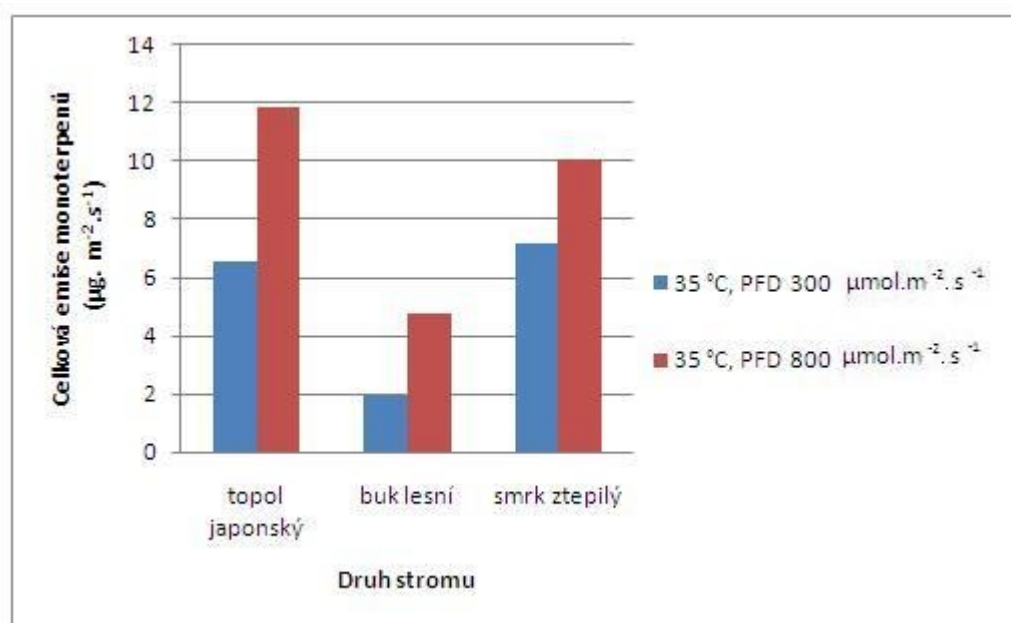
Obr. č. 9. Celková emise monoterpenů (a) a celková emise BVOC (b) pro topol, buk a smrk. Emise byla měřena ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Monoterpény byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX po dobu 30 minut.

Obr. č. 9. (a) a (b) se od sebe liší tím, že v celkové emisi BVOC je zahrnut i isopren. V průměru nejvyšší produkce všech isoprenoidů byla u smrku ztepilého, následoval topol japonský a pak buk lesní. Maximální hodnoty emisí monoterpenů i celkových BVOC však byly pozorovány u topolu při teplotě 35 °C a ozáření 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jak je patrné z obou obrázků, u topolu při konstantní ozáření 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  se zvyšující se teplotou došlo k nepatrnému nárůstu emisí (sloupec 1 a 3), avšak při konstantní ozáření 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  se vzrůstající teplotou došlo k prudkému nárůstu emisí (sloupec 2 a 4). Podobný nárůst způsobený teplotou při vysoké ozáření pozorujeme u smrku. Naopak pro buk lesní se vzrůstající teplotou došlo k poklesu emisí isoprenoidů nezávisle na ozáření. Při konstantní teplotě, ať už 22 °C nebo 35 °C, se zvyšující se ozáření emise naopak stoupla. Můžeme tedy shrnout, že při nižší teplotě 22 °C zvyšující se ozáření emise BVOC zvyšuje jen nepatrně, zatímco při vyšší teplotě 35 °C, která již rostlinou může být vnímána jako stresová, zvýšená ozáření emise BVOC výrazně zvyšuje.



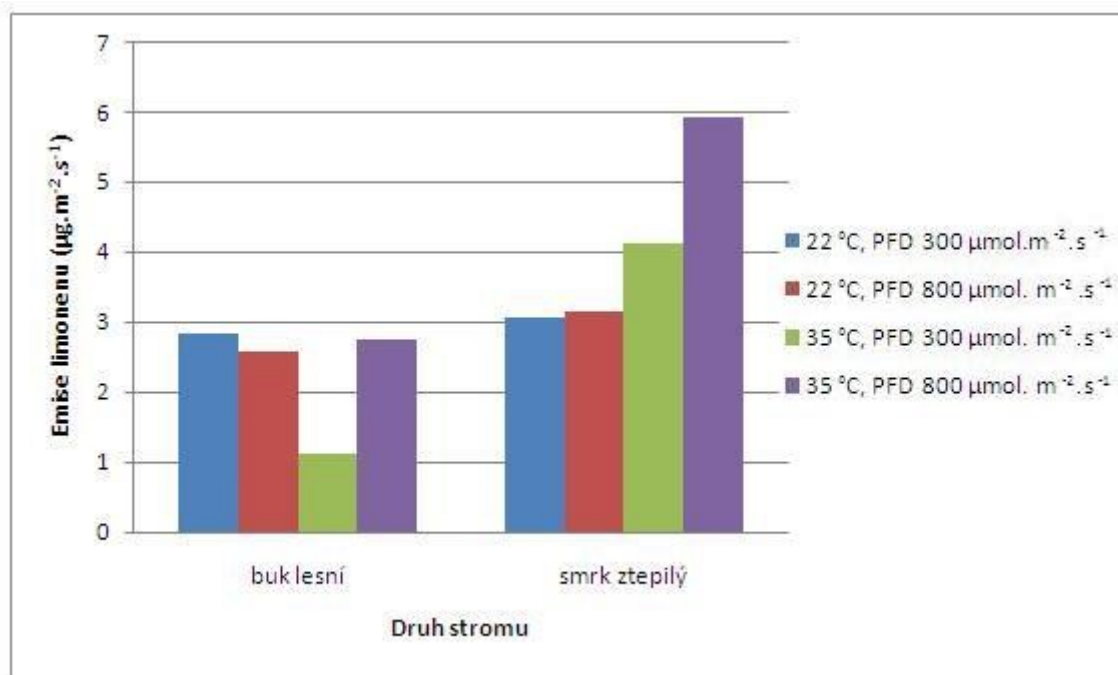
Obr. č. 10. Emise isoprenu v závislosti na rychlosti fotosyntézy pro buk, smrk a topol. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Isopren byl sorbován v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.

Emise jednotlivých monoterpenů jsou barevně odlišené pro každý druh stromu (Obr. č. 10.). Buk je znázorněn zeleně, smrk červeně a topol oranžově. Sytost barvy udává následující parametry prostředí: nejsvětlejší - 22 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; světlá - 22 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; tmavá - 35 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; nejtmavší - 35 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Přičemž emise smrku (35 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a emise buku (22 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se překrývají. Emise isoprenu vztažená na rychlost asimilace  $\text{CO}_2$  ukázala, že emise isoprenu s rostoucí  $A_N$  exponenciálně roste. K významnému ovlivnění produkce isoprenu došlo u topolu japonského, a to jak při zvýšení teploty, tak při zvýšení ozáření. Největší nárůst emise isoprenu byl zaznamenán při teplotě 35 °C a ozáření PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .



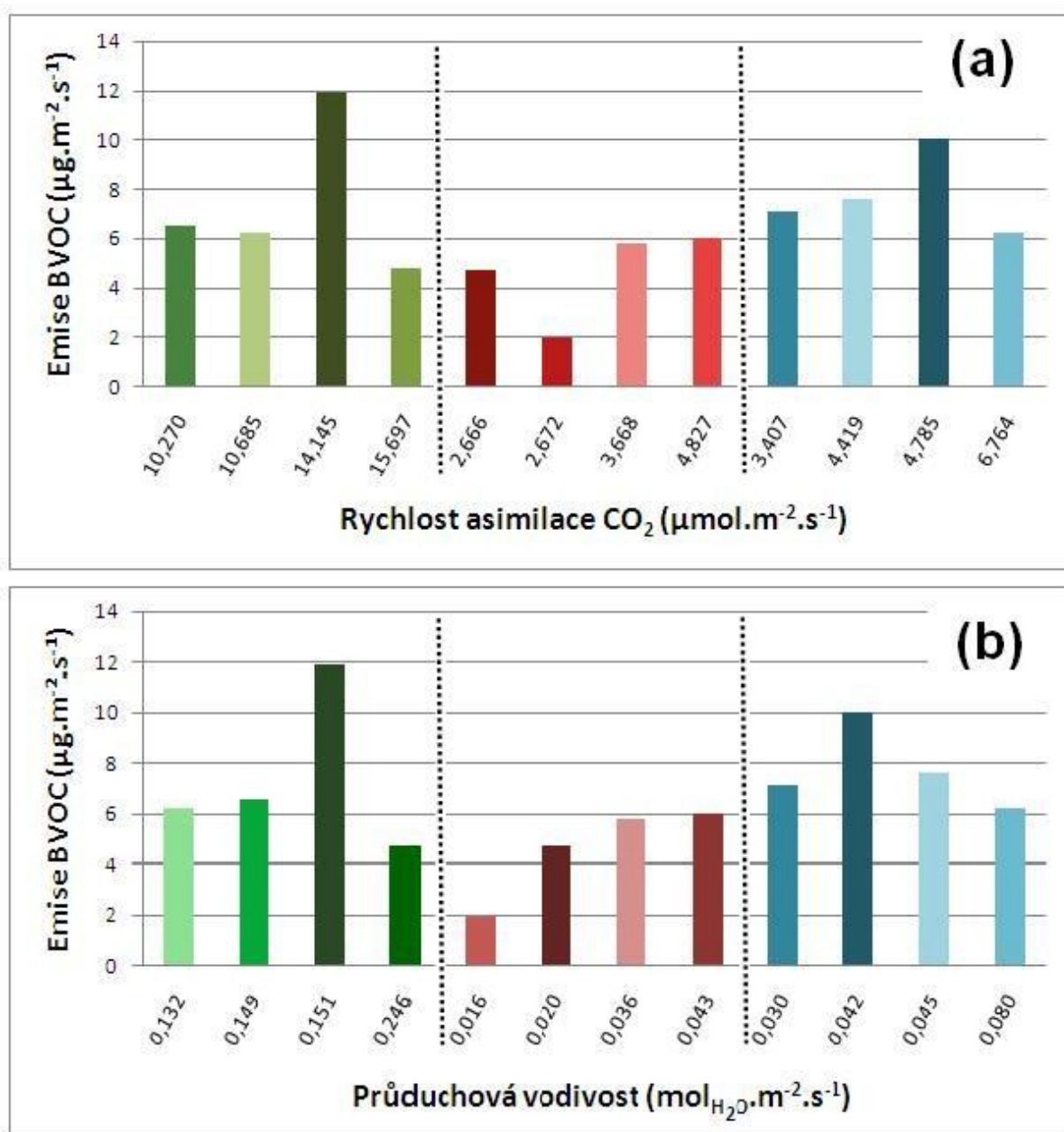
Obr. č. 11. Celková emise monoterpenů z topolu, buku a smrku při teplotě 35 °C a dvou ozářeních (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Monoterpeny byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.

Srovnání emise monoterpenů při teplotě 35 °C a dvou intenzitách ozáření (300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) jednoznačně potvrdila, že se na emisi monoterpenů při vyšších teplotách podílí zejména intenzita záření (Obr. č. 11.)



Obr. č. 12. Emise limonenu pro buk a smrk. Emise byla měřena ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Emise limonenu byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.

Jako zajímavý zástupce monoterpenů se jeví limonen (Obr. č. 12.). Pro srovnání byli vybráni buk a smrk z důvodu toho, že se jedná o přibližně stejně rychle rostoucí druhy, na rozdíl od topolu japonského, jež se považuje za rychle rostoucí s jinými hodnotami fotosyntézy. Při nízké teplotě (22 °C) vlivem ozáření došlo k mírným změnám v produkci limonenu. Avšak až vyšší teplota (35 °C) v kombinaci s vyšší ozáření (800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) u obou sledovaných druhů přispěla k výrazně vyšší produkci limonenu, ale i ke zvýšení emisí ostatních sledovaných isoprenoidů (viz. Obr. č. 8.)



Obr. č. 13. Emise BVOC pro konkrétní  $A_N$  - rychlosti asimilace  $\text{CO}_2$  (a) a pro konkrétní  $g_s$  - průduchovou vodivost (b) u topolu, buku a smrku.  $A_N$  byla měřena gazometrickým systémem LI-6400 XT při čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Každý druh stromu je znázorněn odlišnou barvou; topol zeleně, buk červeně a smrk modře. Současně sytostí barvy jsou v grafu pro každý strom odlišeny parametry prostředí: nejsvětlejší - 22 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; světlá - 22 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; tmavá - 35 °C, PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; nejtmavší - 35 °C, PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Emise BVOC pro konkrétní rychlosti asimilace  $\text{CO}_2$  a průduchovou vodivost pro topol japonský, buk lesní a smrk ztepilý znázorňuje Obr. č. 13.  $A_N$  ani  $g_s$  úzce nekorelují s rychlostí emise BVOC, nedá se tedy zobecnit, že podmínky vedoucí k rychlejší fotosyntéze nebo vyšší průduchové vodivosti povedou ke zvýšení nebo snížení emise BVOC. Z obrázku vyplývá, že pro topol při nízké ozáření se vzrůstající teplotou se sníží emise BVOC, naopak při vysoké ozáření hraje pro produkci těchto látek významnou roli vzrůstající teplota. U buku při nižší teplotě vlivem zvýšení ozáření emise BVOC klesly, tento jev lze vypožorovat také pro vyšší teplotu. U smrku se při nižší teplotě vlivem zvýšení ozáření sníží produkce BVOC, naopak při vyšší teplotě dojde vlivem zvýšení ozáření k nárůstu emisí BVOC. U topolu a smrku při nejvyšší rychlosti asimilace  $\text{CO}_2$  dochází k nejmenší emisi BVOC, kdežto u buku při nejvyšší rychlosti asimilace  $\text{CO}_2$  jsou emise BVOC nejvyšší.



## 9 Závěr

Tato práce teoreticky porovnává míru příspěvku emisí antropogenního a biogenního původu VOC, dále se zaměřuje na rozdělení jednotlivých isoprenoidů (isopren, monoterpeny) a zabývá se reakcemi BVOC s ovzduším. V neposlední řadě zde byly popsány vlivy teploty, ozáření, koncentrace CO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> na emise BVOC. Avšak hlavním cílem této práce bylo navržení a optimalizace odběru vzorku BVOC na sorpční trubičku obsahující TENAX TA společně s analýzou pomocí chromatografické metody spojené s termální desorpčí. Bylo prokázáno, že odběr vzduchu z gazometrické komory, kde se nacházel uzavřený list (jehličí), průtokem 200 ml·min<sup>-1</sup> po dobu 30 minut je postačující a zároveň při tomto postupu nedocházelo k eluci. Za měnící se faktory prostředí ovlivňující emise BVOC byla vybrána teplota (22 °C a 35 °C) a ozáření (300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> a 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

Z naměřených dat bylo sestaveno několik grafů poukazujících na změnu emisí BVOC vlivem teploty a ozáření na topolu japonském, buku lesním a smrku ztepilém. Pro isopren bylo prokázáno, že s rostoucí rychlostí asimilace CO<sub>2</sub> rostou i jeho emise. Tento jev nejprokazatelněji nastal u topolu japonského, jež se považuje za rychle rostoucí druh využívající asimilovaný uhlík k překotné tvorbě biomasy. V rámci jednotlivých monoterpenů ve všech třech námi vybraných zástupcích stromů byl nejhojněji emitován limonen, následoval α-pinen, 3-careen, β-pinen a camphen. Zajímavostí však zůstává, že nejvyšší emise α-pinenu byly naměřeny pro topol japonský, nikoliv pro smrk ztepilý, jakožto zástupce jehličnatých stromů, pro něž by měly být tyto emise výrazné. Pro tento druh byly nejvyšší emise camphenu a limonenu, který převládal také u obou zbývajících stromů. V celkové emisi BVOC má prvenství smrk ztepilý s 31,0 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, o trochu nižší emise BVOC má topol japonský 29,5 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> a výrazně nižší emise BVOC má buk lesní 18,5 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. U všech měření byl prokázán výrazný vliv ozáření na zvyšování emise isoprenoidů až při teplotě 35 °C, kdy tyto parametry prostředí pro rostlinu aklimatizovanou na 16 °C a ozáření 100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> byly stresující. Analýza taktéž potvrdila, že na emise BVOC nemají vliv pouze parametry prostředí, ale také druh rostliny.

## Seznam použité literatury

- [1] KESSELMEIER J. and M. STAUDT. Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An Overview on Emission, Physiology and Ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 1999, **33**(1): 23-88. ISSN 15730662.
- [2] VEČEŘA, Zbyněk. Isoprenoidy v atmosféře. *Chemické listy*. Praha: Česká společnost chemická. Str. 157- 162 [cit. 2015-11-12]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/archiv/2001/03-PDF/157-162.pdf>
- [3] LORETO, F et al. Plant volatiles and the environment. *Plant, Cell & Environment* [online]. 2014, **37**(8): 1905-1908 [cit. 2015-11-13]. DOI: 10.1111/pce.12369. ISSN 01407791. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/pce.12369>
- [4] SHARKEY, Thomas D., A. E. WIBERLEY and A. R. DONOHUE. Isoprene Emission from Plants: Why and How. *Annals of Botany* [online]. 2007, **101**(1): 5-18 [cit. 2015-11-13]. DOI: 10.1093/aob/mcm240. ISSN 0305-7364. Dostupné z: <http://aob.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/aob/mcm240>
- [5] WAGNER, Patrick a Wilhelm KUTTLER. Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere - A case study in Essen, Germany. *Science of The Total Environment* [online]. 2014, **475**, 104-115 [cit. 2016-03-22]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.026. ISSN 00489697. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969713014800>
- [6] DVOŘÁKOVÁ, M. aj. Monoterpeny v rostlinách. *Chemické listy*. Praha: Česká společnost chemická. Str. 839-845 [cit. 2015-11-12]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/common/article-vol\\_105-issue\\_11-page\\_839.html](http://www.chemicke-listy.cz/common/article-vol_105-issue_11-page_839.html)
- [7] CALFAPIETRA, C. et al. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environmental Pollution* [online]. 2013, **183**: 71-80 [cit. 2015-11-10]. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.012. ISSN 02697491. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749113001310>
- [8] HELLÉN, H. et al. Importance of monoterpenes and isoprene in urban air in northern Europe. *Atmospheric Environment* [online]. 2012, 2015-11-25, **59**: 59-66 [cit. 2015-11-25]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.04.049. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231012003949>

- [9] CALVERT, Jack G. et al. *The mechanisms of reactions influencing atmospheric ozone*. New York, NY: Oxford University Press, 2015, xvii, 590 pages. ISBN 9780190233020.
- [10] SHARKEY, Thomas D. and Russell K. MONSON. The future of isoprene emission from leaves, canopies and landscapes. *Plant, Cell & Environment* [online]. 2014, **37** (8): 1727-1740 [cit. 2015-11-10]. DOI: 10.1111/pce.12289. ISSN 01407791. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/pce.12289>
- [11] MONSON, Russell K. et al. Relationships among Isoprene Emission Rate, Photosynthesis, and Isoprene Synthase Activity as Influenced by Temperature. *Plant physiology* [online]. 1992, **98** (3): 1175-1180 [cit. 2015-11-27]. ISSN 0032-0889. Dostupné z: <http://www.plantphysiol.org/content/98/3/1175.full.pdf>
- [12] ŠIMPRAGA, M. et al. Comparing monoterpenoid emissions and net photosynthesis of beech (*Fagus sylvatica* L.) in controlled and natural conditions. *Atmospheric Environment* [online]. 2011, **45** (17), 2922-2928 [cit. 2016-01-20]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.047. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231011000884>
- [13] SCHUH, G. et al. Emissions of Volatile Organic Compounds from Sun flower and Beech: Dependence on Temperature and Light Intensity. *Journal of Atmospheric Chemistry* [online]. **27**(3): 291-318 [cit. 2015-11-26]. DOI: 10.1023/A:1005850710257. ISSN 01677764. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1005850710257>
- [14] RINNAN, R. et al. Plant volatiles in extreme terrestrial and marine environments. *Plant, Cell & Environment* [online]. 2014, **37** (8): 1776-1789 [cit. 2015-11-25]. DOI: 10.1111/pce.12320. ISSN 01407791. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/pce.12320>
- [15] KROUPA, A. aj. Stanovení sorpční kapacity sorbentu Tenax TA pro určení koncentrací vybraných organických látek v ovzduší. *Chemické listy*. Praha: Česká společnost chemická. Str. 339-344 [cit. 2015-11-17]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2005\\_05\\_339-344.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2005_05_339-344.pdf)
- [16] KUMAR, Anuj and Ivan VÍDEN. Volatile Organic Compounds: Sampling Methods and Their Worldwide Profile in Ambient Air. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 2007-6-22, **131** (1-3): 301-321 [cit. 2015-11-17]. DOI: 10.1007/s10661-006-9477-1. ISSN 0167-6369. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-006-9477-1>

- [17] ČAPOUN, Tomáš a Jana KRYKORKOVÁ. Analýza látek v ovzduší metodou GC/MS se sorpčními trubičkami Tenax. *The science for population protection* [online]. Lázně Bohdaneč: MV - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, Institut ochrany obyvatelstva, 2008: 17-29 [cit. 2015-11-17]. ISSN 1803-568x. Dostupné z: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/5/27.pdf>
- [18] PERTILE, Eva a Vladimír ČABLÍK. *Instrumentální metody analýzy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 238 s. ISBN 80-248-1049-2.
- [19] JOSKA, Luděk a Kateřina PŘIKRYLOVÁ. *Speciální chemické a instrumentální analytické metody*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [Praha], 1990, 251 str. ISBN 80-7080-060-7.
- [20] AYDIN, Yagmur Meltem et al. Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species. *Science of The Total Environment* [online]. 2014, **490**, 239-253 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.132. ISSN 00489697. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969714006585>
- [21] CURTIS, A. J. et al. Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program. *Atmospheric Environment* [online]. 2014, **95**, 634-643 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.035. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231014004816>
- [22] The National Center for Biotechnology Information. PubChem Substance. *The National Center for Biotechnology Information* [online]. USA-U.S. National Library of Medicine, [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

## Seznam obrázků

<b>Obr. č. 1.</b> Závislost fotosyntetické asimilace, emise isoprenu a rychlosti transportu elektronů na teplotě listů. [11].....	21
<b>Obr. č. 2.</b> Závislost uhlíkového poměru (monoterpeny/fotosyntéza) na teplotě mladého buku pěstovaného v růstové komoře za řízených podmínek (a) a dospělého buku v lese za přirozených podmínek (b).[12] .....	22
<b>Obr. č. 3.</b> Zástupci rostlinných druhů: buk lesní (a), japonský topol (b), smrk ztepilý (c). ....	29
<b>Obr. č. 4.</b> Odběrová aparatura. Vlevo se nachází gazometrický přístroj LI-6400 XT. List rostliny je uzavřen do komory tohoto zařízení, odkud je odsáván vzduch pomocí pumpy GilAir Plus přes sorpční trubičku naplněnou Tenaxem TA.....	31
<b>Obr. č. 5.</b> Aparatura, na níž probíhaly analýzy vzorků: Hmotnostní spektrometr Agilent Technologies 5975C insert XL MSD (a), plynový chromatograf Agilent Technologies 7890A GC (b), termální desorber TurboMatrix 300 (c). ....	32
<b>Obr. č. 6.</b> $A_N$ - rychlost asimilace $CO_2$ (a) a $g_s$ - průduchová vodivost (b) topolu, buku a smrku. Fyziologické parametry byly měřeny gazometrickým systémem LI-6400 XT při čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). ....	36
<b>Obr. č. 7.</b> Emise isoprenu pro topol, buk a smrk. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Isopren byl sorbován v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut. ....	37
<b>Obr. č. 8.</b> Emise jednotlivých monoterpenů z topolu, buku a smrku. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Monoterpeny byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut. ....	38
<b>Obr. č. 9.</b> Celková emise monoterpenů (a) a celková emise BVOC (b) pro topol, buk a smrk. Emise byla měřena ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Monoterpeny byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX po dobu 30 minut.....	39
<b>Obr. č. 10.</b> Emise isoprenu v závislosti na rychlosti fotosyntézy pro buk, smrk a topol. Emise byla měřena z jednotlivých listů (topol a buk) nebo výhonů (smrk) ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Isopren byl sorbován v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut. ....	40
<b>Obr. č. 11.</b> Celková emise monoterpenů z topolu, buku a smrku při teplotě 35 °C a dvou ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ a 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Monoterpeny byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut. ....	41
<b>Obr. č. 12.</b> Emise limonenu pro buk a smrk. Emise byla měřena ve čtyřech kombinacích teploty (22 °C nebo 35 °C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Emise limonenu byly sorbovány v průtočném systému na sorpční trubičky obsahující TENAX TA po dobu 30 minut.....	42
<b>Obr. č. 13.</b> Emise BVOC pro konkrétní $A_N$ - rychlosti asimilace $CO_2$ (a) a pro konkrétní $g_s$ - průduchovou vodivost (b) u topolu, buku a smrku. $A_N$ byla měřena gazometrickým systémem LI-6400 XT při čtyřech kombinacích teploty (22°C nebo 35°C) a ozáření (PFD 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ nebo 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). ....	43

## Seznam tabulek

<b>Tab. č. 1.</b> Přehled analyzovaných látek.[22].....	30
<b>Tab. č. 2.</b> Souhrnná tabulka dat parametrů prostředí a analyzovaných látek.....	35

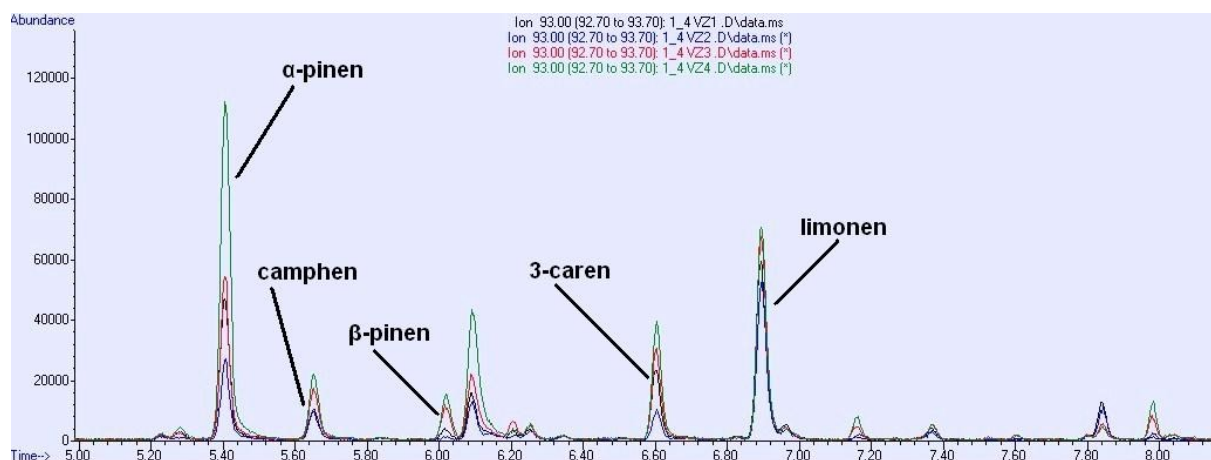
## Seznam použitých zkratek

VOC	těkavé organické látky
BVOC	biogenní těkavé organické látky
DU	Dobsonova jednotka
UV záření	ultrafialové záření
ppm	parts per million (částice na jeden milion, 10 <sup>-6</sup> )
·OH	hydroxylový radikál
O <sub>3</sub>	ozon
hν	energie fotonu
λ	vlnová délka
O·	kyslíkový radikál
O <sub>2</sub>	kyslík
H <sub>2</sub> O	voda
NO <sub>2</sub>	oxid dusičitý
M	molekula stabilizující ozon a absorbující přebytečnou energii
HNO <sub>3</sub>	kyselina dusičitá
NO	oxid dusnatý
N <sub>2</sub>	dusík
Tg C·rok <sup>-1</sup>	teragram (miliarda kilogramů) uhlíku za rok
NO <sub>x</sub>	oxidy dusíku
SOA	sekundární organický aerosol
IPP	isopentenylidifosfát
DMAPP	dimethylallyldifosfát
GPP	geranyldifosfát
ppb	parts per billion (částice na jeden bilion, 10 <sup>-9</sup> )
HO <sub>2</sub> ·	hydroperoxylový radikál

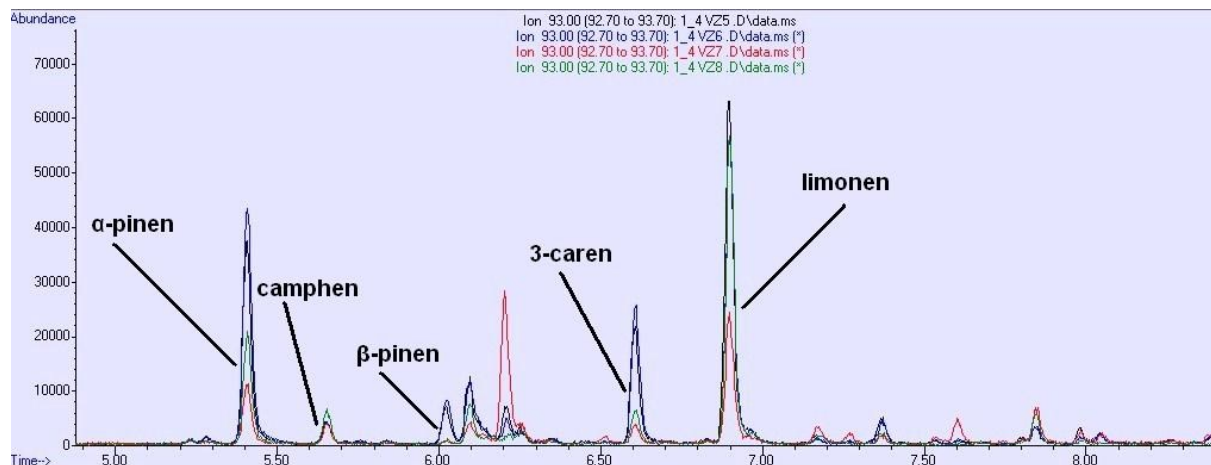
$\text{g O}_3 \cdot \text{l g}^{-1} \text{ VOC}$	gram ozonu na gram těkavých organických látek
$\text{O}_2^{\cdot -}$	superoxid
$\text{H}_2\text{O}_2$	peroxid vodíku
$\text{CO}_2$	oxid uhličitý
A	fotosyntetická asimilace
$J_F$	rychlost elektronového transportu
GAP	glyceraldehyd-3-fosfát
MEP	2-C-methylerythritol-4-fosfát
TCD	teplotně vodivostní detektor
FID	plamenový ionizační detektor
AFID	plamenový ionizační detektor s alkalickým kovem
TID	bezplamenový ionizační detektor s alkalickým kovem
ECD	detektor elektronového záchytu
PID	fotoionizační detektor
MS	hmotnostní spektrometr
$A_N$	Rychlost asimilace $\text{CO}_2$
$g_s$	průduchová vodivost
PFD	photon flux density (hustota toku fotonu)



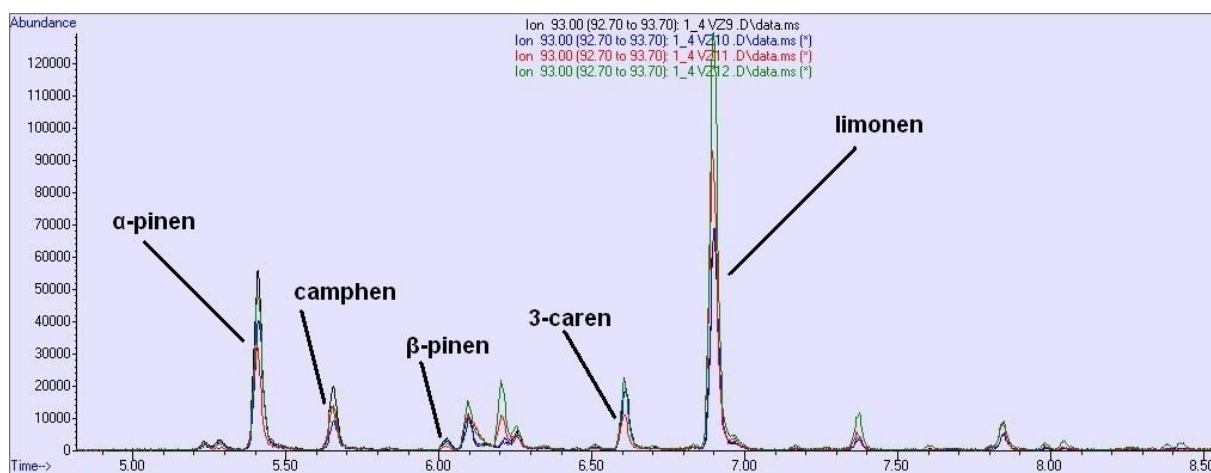
## Přílohy



Chromatogram pro topol japonský. Vyhodnocení probíhalo na iontu  $m/z$  93. Barevně jsou zaznačeny rozdílné parametry prostředí, při nichž probíhal odběr vzorku: černá - 22 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , modrá - 22 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , červená - 35 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , zelená - 35 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Chromatogram pro buk lesní. Vyhodnocení probíhalo na iontu  $m/z$  93. Barevně jsou zaznačeny rozdílné parametry prostředí, při nichž probíhal odběr vzorku: černá - 22 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , modrá - 22 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , červená - 35 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , zelená - 35 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Chromatogram pro smrk ztepilý. Vyhodnocení probíhalo na iontu m/z 93. Barevně jsou zaznačeny rozdílné parametry prostředí, při nichž probíhal odběr vzorku: černá - 22 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , modrá - 22 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , červená - 35 °C a PFD 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , zelená - 35 °C a PFD 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .